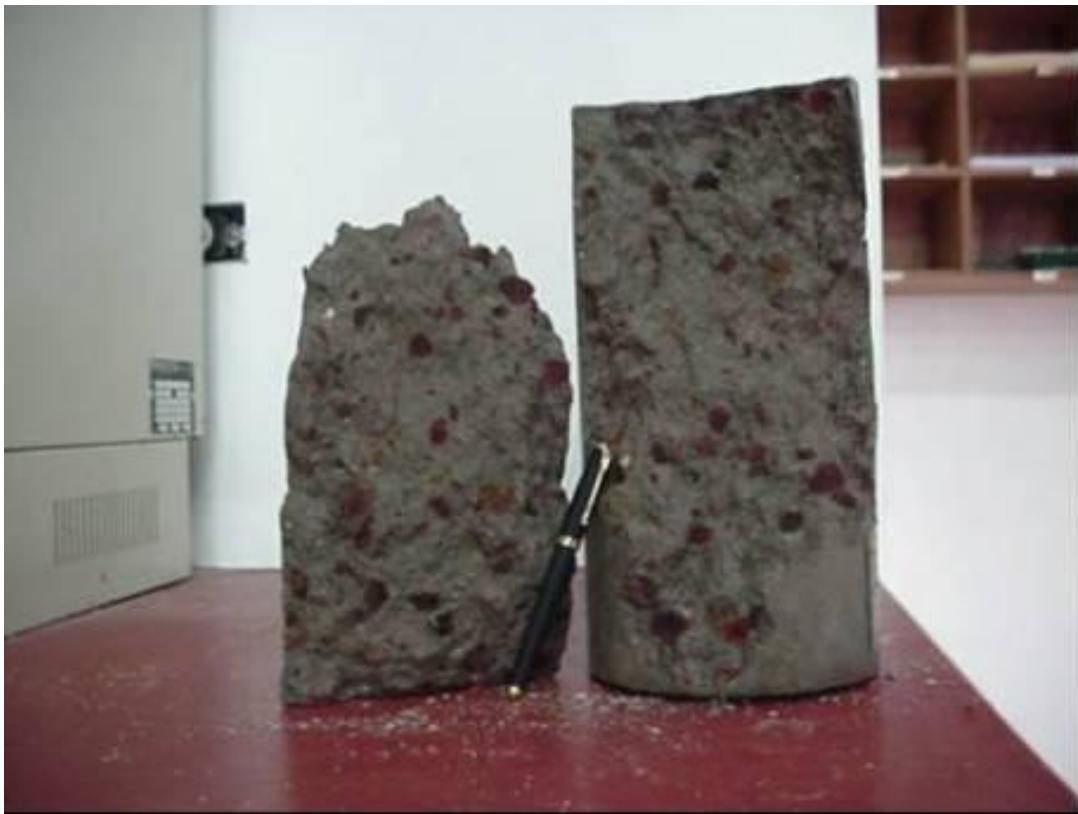


Diseño de mezclas de concreto con agregado grueso del tajo Chopo



Abstract

Here are the results of the materials tests from Chopo quarry to evaluate their possible use as a coarse-grained aggregate in the design of cement mixes.

This material has characteristics that classify it as a light- to normal-weight aggregate, which is why two design methods from the American Concrete Institute (ACI) were analyzed in order to determine the best application for this aggregate.

The result show that the Chopo aggregate complies with all of the requirements established by Costa Rican norms as well as those established by the ASTM C 330 norm. For this reason, it can be used in the design of concrete mixes. Regardless of the method used for the design, the required resistance is achieved. As for cost efficiency, it is more economic to use the ACI 211.2 design with the Chopo aggregate rather than the concrete used by Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) and the Cañas area.

Key words: Chopo, Coarse aggregate, Fine aggregate, Concrete, Design, Light-weight concrete, Normal-weight concrete, ACI 211.1, ACI 211.2

Resumen

Se presenta un resumen del estudio realizado al material proveniente del tajo Chopo, con miras a utilizarlo como agregado grueso en el diseño de mezclas de concreto.

Este material presenta características específicas que lo pueden clasificar, tanto como agregado de peso liviano, como de peso normal. Por tal motivo, se desarrollaron los dos métodos de diseños indicados en el American Concrete Institute (ACI) 211, con el fin de determinar cuál de los dos métodos se aplica mejor para este agregado.

Los resultados muestran que el agregado Chopo cumple con todos los requisitos establecidos en las normas de Costa Rica, así como la establecida en la norma ASTM C 330, por lo que se puede emplear para el diseño de mezclas de concreto. Indistintamente del método empleado para el diseño, se logra la resistencia requerida. En cuanto a costos es más económico el empleo del diseño ACI 211.2, utilizando agregado Chopo que el concreto empleado por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y el de la zona de Cañas.

Palabras claves: Chopo, Agregado grueso, Agregado fino, Concreto, Diseño, Concreto liviano, Concreto normal, ACI 211.1, ACI 211.2

Diseño de mezclas de concreto con agregado grueso del tajo Chopo

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción
Programa de Licenciatura**

**Diseño de mezclas de concreto con agregado
grueso del tajo Chopo**

**Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción**

ING. MARIO ALBERTO SOLANO ORTEGA

Enero, 2003

Contenido

PREFACIO	1
RESUMEN EJECUTIVO.....	2
INTRODUCCIÓN.....	5
METODOLOGÍA.....	6
MARCO TEÓRICO	7
CONCRETO ACI 211.1.....	7
CONCRETO ACI 211.2.....	7
AGREGADOS LIVIANOS Y	
NORMALES.....	8
ANTECEDENTES.....	9
GEOLOGÍA DE TAJO CHOPO	9
USOS DE LA PIEDRA DEL TAJO	
CHOPO.....	9
RESULTADOS	13
DISEÑO Y RESISTENCIA	16
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	20
COSTO DEL CONCRETO.....	24
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	25
AGREGADO GRUESO	25
AGREGADO FINO.....	26
PRIMER DISEÑO	26
DISEÑO CORREGIDO	27
RESISTENCIA DEL CONCRETO.....	28
COMPARACIÓN DE COSTOS.....	29
OBSERVACIONES FINALES	30
CONCLUSIONES	31
APÉNDICES	32
ANEXOS.....	34
REFERENCIAS	43

Prefacio

La industria de la construcción está en constante investigación para utilizar nuevos materiales o mejorar los ya existentes, con los cuales los costos de los proyectos se reduzcan o se mejoren las propiedades de los mismos, por lo que se debe aprovechar al máximo los recursos disponibles.

La piedra del tajo Chopo (liviana, porosa y de alta resistencia) tradicionalmente se ha empleado en gran cantidad para la construcción y mantenimiento de carreteras debido a su bajo costo, producto de que el material se encuentra en su estado natural sin compactación, lo que conlleva a que el único trabajo necesario por realizar para su empleo sea el tamizado. Por tal motivo, resulta importante para la ingeniería en construcción, el empleo alternativo del material de este tajo, como fuente de agregado grueso para mezclas de concreto, que pueden ser empleadas por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y en las obras de ingeniería en general de la zona de Cañas, aprovechando su bajo precio, sin tener que recurrir a nuevas fuentes de agregados de tajos o ríos, y así contribuir con el medio ambiente. Este último

aspecto, es de suma importancia debido a los serios cuestionamientos que han surgido en los últimos meses, en relación con alteraciones nocivas causadas a los mantos acuíferos como consecuencia de la explotación de algunos tajos.

Por lo anterior, el presente documento tiene como objetivo realizar estudios al material del tajo Chopo, ante la posibilidad de emplearlo como agregado grueso en el diseño de mezclas de concreto de varias resistencias, para el empleo en diferentes obras de ingeniería. A partir de este estudio se determinará cual es el mejor método de diseño, según lo estipulado en el American Concrete Institute (ACI) 211.1.91, práctica para dosificar concreto normal, pesado y masivo y el ACI 211.2.91, práctica para dosificar concreto estructural de peso liviano.

Le agradezco profundamente a todo el personal del laboratorio de materiales del Proyecto Geotérmico Miravalles V del ICE, por su valiosa y desinteresada colaboración en la realización del proyecto. También doy gracias a mi familia, amigos, a mi novia y a todos los que de alguna manera me brindaron su colaboración, apoyo y confianza.

Resumen ejecutivo

El concreto es uno de los materiales más importantes en la industria de la construcción, principalmente por sus propiedades en estado fresco, endurecido y su costo. Estas características dependerán principalmente de los componentes del concreto, cemento y agregados. Un alto porcentaje del peso y volumen del concreto lo constituyen los agregados (75-80%), elementos que influyen en la calidad y costo del concreto.

Estudios realizados demuestran que en el país se emplean algunos agregados, tanto finos como gruesos, que no cumplen con los requisitos establecidos en la norma N° 10854 Ministerio de Economía Industria y Comercio (MEIC), por lo que la calidad de las obras construidas con estos agregados es cuestionable. Por otra parte, existen fuentes de agregados que tradicionalmente han sido empleados en la industria de la construcción de caminos, los cuales han tenido excelentes resultados, cumplen con los requisitos técnicos indicados en las normas y a un precio competitivo; como es el material proveniente del tajo Chopo, localizado a 6 Km al norte del cantón de Cañas, Guanacaste.

Es de importancia el empleo alternativo del material de este tajo, debido a su bajo precio, como fuente de agregado grueso para mezclas de concreto; que puede ser empleado en los trabajos que realizará el ICE, en el Proyecto Geotérmico Miravalles V y en la industria de la construcción en general de la zona de Cañas alterando poco el medio ambiente, tema que día con día es de mucha influencia en el desarrollo de cualquier proyecto de construcción.

El objetivo general del estudio fue analizar el material proveniente del tajo Chopo, y la posibilidad de su empleo como agregado grueso en el diseño de mezclas de concreto, tendientes a ser utilizados en los concretos que empleará el ICE en el Proyecto Geotérmico

Miravalles V, y para la industria de la construcción en general.

Los objetivos específicos que orientaron el estudio fueron:

- a. Investigar sobre la formación geológica del tajo y los usos de este material en la construcción de carreteras y caminos.
- b. Realizar pruebas de laboratorio a la piedra Chopo y arena de la zona para el diseño de mezclas de concreto de varias resistencias.
- c. Definir el método de diseño de mezcla adecuado para este tipo de agregado, según el ACI 211.1 y 211.2, a partir de las pruebas de laboratorio, para resistencias a la compresión de 175, 210 y 280 kg/cm².
- d. Comparar el costo por metro cúbico de la mezcla de 210 kg/cm² de resistencia a la compresión con piedra Chopo, con el concreto empleado por el ICE en el Proyecto Geotérmico Miravalles y el de la zona de Cañas.

Para lograr estos objetivos inicialmente fue necesario estudiar los diferentes tipos y métodos de diseño de mezclas de concreto indicados por el American Concrete Institute, comité 211 (ACI), así como aspectos geológicos del tajo y los principales usos que se le han dado al material del tajo Chopo.

Como se indicó, el agregado grueso en estudio proviene del tajo Chopo. En cuanto al fino, se tomó el que actualmente emplea el ICE en sus mezclas de concreto, que se explota en el río Pijije, ubicado en el cantón de Bagaces, provincia de Guanacaste, material utilizado ampliamente en la zona para la preparación de concreto.

Las muestras de los agregados fueron tomadas siguiendo los procedimientos indicados en las normas AASHTO T2, y trasladados al laboratorio de materiales del ICE del Proyecto Geotérmico Miravalles, donde fueron sometidos a ensayos siguiendo los procedimientos establecidos en las normas ASTM, aplicables para evaluar los agregados que se utilizan en el diseño de mezclas de concreto. Los valores obtenidos fueron comparados con la norma oficial de Costa Rica N° 10854 MEIC, que regula el empleo de agregados para concreto.

El cuadro 1 resume las principales propiedades físicas y mecánicas de los agregados en estudio, valores que están dentro del rango permitido por la norma citada.

En cuanto a la granulometría de estos, también están dentro de los rangos establecidos en la norma, por lo que son aptos para su empleo en el diseño de mezclas de concreto.

Cuadro 1. Principales propiedades agregados grueso y fino

Caract.	Und.	Agregado grueso		Agregado fino	
		Chopo	Norma 10854 MEIC	Pijije	Norma 10854 MEIC
Abrasión	%	23.48	50.00	--	--
Sanidad	%	1.98		8.13	15.00
Impurezas orgánicas	p.p.m	--	--	> 500	> 500
Modulo de finura	--	--	--	2.79	2.3-3.1
Sustancias deletéreas					
Lavado malla N° 200	%	1.96	1.00	2.77	4.00
Partículas friables	%	1.70	5.00	3.00	3.00

(Imagen Excel)

El agregado Chopo tiene una gravedad específica de 1,78, la cual está en el rango de agregados livianos (ACI 211.2), sin embargo, el peso unitario envarillado es de 1 173 kg/m³, por lo que no clasificaría como tal según la norma ASTM C 300, en la que se indica que el agregado grueso liviano debe tener como máximo un peso unitario de 880 kg/m³. Pero como lo establece Muñoz y Ramírez en sus obras **Componentes**

principales de las mezclas de concreto (1998) y **Características de los agregados nacionales: resto del país** (1994), el agregado Chopo, por su peso unitario y gravedad específica puede ser considerado como de peso liviano. Por tal motivo, fue importante realizar el diseño de las mezclas considerando el agregado de peso normal y liviano, con el fin de determinar cuál de los dos métodos de diseño se aplica mejor.

Con los datos de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados se procedió con los diseños propuestos (175, 210 y 280 kg/cm²), aplicando los dos métodos de diseño indicados en el ACI, 211.1 para agregado de peso normal y 211.2 para agregado de peso liviano.

En vista de que los agregados presentan un alto porcentaje de absorción (principalmente el grueso 10,1%), se emplearon estos materiales en condición saturada, con el fin de que el agua de absorción no pasare a formar parte del agua de mezcla, aumentando la relación agua-cemento y por consiguiente, se produjera una disminución en la resistencia de las mezclas.

Inicialmente se preparó una primera batida de prueba, en la que se midió el revenimiento y se comparó con el rango de diseño fijado, cuando no estuvo dentro del rango, se procedió con los ajustes de agua para obtener el valor de revenimiento propuesto. Con las correcciones realizadas se procedió con la preparación de las mezclas para la confección de los cilindros; ocho por cada diseño, para un total de 48 cilindros, los cuales fueron fallados a los 3, 7, 14 y 28 días de curado, dos por cada resistencia y por método de diseño.

El valor promedio de resistencia a la compresión, para los especímenes fallados según la edad de curado, fue siempre mayor a la resistencia teórica proyectada. Llegando a superar inclusive hasta en un 45% el valor de diseño para el método ACI 211.2 para la resistencia de 175 kg/cm² y en un 32% para el otro método de diseño aplicado a la misma resistencia citada.

En cuanto a la comparación por metro cúbico de los costos del concreto Chopo con el del ICE (210 kg/cm²), se determinó un ahorro de 8,4 % empleando el diseño como agregado de peso normal y de 14,6 % cuando se empleó como agregado de peso liviano, y con el concreto de la misma resistencia de la zona de Cañas, se obtuvo un ahorro de 13,6 % cuando se empleó el

diseño ACI 211.1 y de 19,5 % con el diseño ACI 211.2.

Como resultado de este estudio se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Por las características propias del agregado Chopo, puede ser clasificado como agregado de peso normal o agregado de peso liviano.

Las pruebas realizadas a la piedra Chopo demuestran que es apta para su empleo en mezclas de concreto.

Los dos métodos indicados por el ACI (211.1 y 211.2) se pueden aplicar al agregado Chopo en el diseño de mezclas de concreto.

Los valores de resistencia a la compresión obtenidos de los cilindros fallados, superan los

valores esperados, con los dos métodos de diseño ACI aplicados.

Al utilizar la piedra Chopo como agregado grueso en mezclas de concreto, el precio por metro cúbico de este se reduce (8,4 a 19,5%).

En el diseño ACI 211.2, para el agregado Chopo las mezclas requieren de mayor cantidad de agregado grueso, pero el costo del concreto por metro cúbico se reduce más.

Son más trabajables las mezclas preparadas con el diseño ACI 221.1, debido a que requiere menor cantidad de piedra Chopo.

Explotando el agregado del tajo Chopo para emplearlo en mezclas de concreto, se evita tener que recurrir a nuevas fuentes de materiales, con ello se contribuye a mantener el medio ambiente.

Introducción

El concreto es uno de los materiales más importantes en casi todos los proyectos de la industria de la construcción, debido a sus propiedades en estado fresco, endurecido y su costo. Las características del concreto van a depender de la trabajabilidad en su estado fresco y a la resistencia cuando endurece. Tal cualidad dependerá de la materia prima que se emplee, principalmente del cemento y de los agregados tanto finos como gruesos. Un alto porcentaje del volumen y del peso del concreto lo constituye los agregados (entre el 75-80%), elementos que influyen en la calidad y costo del concreto.

Estudios realizados en este sentido, demuestran que algunos agregados, tanto finos como gruesos, no satisfacen los requisitos establecidos en las normas para su uso en las mezclas de concreto. También existen fuentes de agregados que por la información que se posee o por tradición, han sido empleados para otros usos específicos.

Por lo anterior, el objetivo general del estudio es analizar el material proveniente del tajo Chopo, para su empleo como agregado grueso en el diseño de mezclas de concreto,

tendientes a ser utilizados en los concretos que empleará el ICE en el Proyecto Geotérmico Miravalles V, y para la industria de la construcción en general.

Los objetivos específicos del estudio son:

1. Investigar sobre la formación geológica del tajo y los usos de este material en la construcción de carreteras y caminos.
2. Realizar pruebas de laboratorio a la piedra Chopo y arena de la zona para el diseño de mezclas de concreto de varias resistencias.
3. Definir el método de diseño de mezcla adecuado para este tipo de agregado, según el ACI 211.1 y 211.2, a partir de las pruebas de laboratorio, para resistencias a la compresión de 175, 210 y 280 kg/cm².
4. Comparar el costo por metro cúbico de la mezcla de 210 kg/cm² de resistencia a la compresión con piedra Chopo, con el concreto empleado por el ICE en el Proyecto Geotérmico Miravalles y el usado en la zona de Cañas.

Metodología

La metodología empleada para el desarrollo del proyecto, consistió en la investigación bibliográfica y consultas personales, sobre el tipo de formación geológica del tajo Chopo, así como de los principales usos que se le ha dado a este material en la industria de la construcción.

Posteriormente se procedió con la recolección de los agregados. La piedra Chopo que se muestreó fue la que el concesionario denomina como piedra cuarta, fue tomada del apilamiento que se tenía en el tajo. Para el caso de la arena se escogió la arena del apilamiento que tiene el ICE en el Proyecto Geotérmico Miravalles, la cual es extraída del río Pijije del cantón de Bagaces, esta arena es empleada ampliamente en la zona como agregado fino para mezclas de concreto.

Las muestras tomadas fueron trasladadas al laboratorio de materiales del Proyecto Geotérmico Miravalles V del ICE. Se sometieron a las pruebas de laboratorio indicadas en las normas ASTM correspondientes a cada material y los resultados se compararon con la norma vigente de Costa Rica N° 10854-Ministerio de Economía Industria y Comercio (MEIC) tendientes a determinar su cumplimiento para el empleo en el diseño de mezclas de concreto.

Las pruebas realizadas a los agregados, según las normas ASTM fueron:

- Granulometría para finos y gruesos, ASTM C136 y ASTM C-330.
- Lavado malla 200 para finos y gruesos, ASTM C 117.
- Abrasión para el agregado grueso, ASTM C 131.
- Gravedad específica y absorción para agregados gruesos y finos, ASTM C 127 y ASTM C 128.
- Peso unitario suelto y envarillado para finos y gruesos, ASTM C 29.

- Sanidad para finos y gruesos, ASTM C 88.
- Partículas friables para agregados finos y gruesos, ASTM C 142
- Impurezas orgánicas para agregados finos, ASTM C 40.

Una vez obtenido los resultados, se procedió con el diseño teórico de las mezclas de concreto para las resistencias a la compresión de 175, 210 y 280 kg/cm², aplicando lo estipulado por el ACI 211.1 y ACI 211.2. Para ello se tomó como supuesto los siguientes datos:

- Revenimiento entre 76 mm a 100 mm (que puede ser para vigas, columnas, muros, cimientos, etc.)
- Control de obra regular para un coeficiente de variación de 15, para un factor de seguridad de 15%.
- Concreto no sometido a condiciones severas.

Una vez obtenidos los diseños, se continuó con la preparación de las mezclas, empleando cemento Portland tipo I (MP). Se aplicaron correcciones por diseño, con el propósito de mejorar la trabajabilidad de la mezcla cuando fue necesario. Se tomaron dos muestras por cada diseño y se fallaron a 3, 7, 14 y 28 días, según la norma ASTM C 39, C 192, C 143 y C 138. Con los datos obtenidos se determinó cuál es el mejor método de diseño para este agregado grueso.

Para la comparación del costo del concreto de 210 kg/cm² de resistencia a la compresión, se usaron los costos, materiales y el diseño empleado por el ICE, en el Proyecto Geotérmico Miravalles y el proporcionamiento indicado en el **Catálogo General de Productos de Concreto** para el concreto Cañas, en este último se tomaron como parámetros los costos de los materiales del comercio en Cañas.

Marco Teórico

El concreto u hormigón es una mezcla de cemento Portland, agregados (finos y gruesos) y agua, también puede contener cierta cantidad de aire, ya sea atrapado o incorporado por medio de un aditivo inclusor de aire. También se pueden agregar otros tipos de aditivos con el fin de acelerar o retardar el fraguado, mejorar la trabajabilidad, etc. Esta mezcla se mantiene en estado semilíquido temporalmente, lo que permite colarlo y moldearlo de la forma en que sea requerido. Posteriormente, esta mezcla se endurece hasta formar una masa sólida, que se convierte finalmente en el material mecánicamente resistente que es el concreto endurecido.

Dependiendo del tipo de agregado que se emplea en las mezclas, así será el peso del concreto; el ACI comité 211, clasifica al concreto como de peso normal, pesado, masivo y concreto estructural liviano.

Concreto ACI 211.1

Dentro de esta clasificación del ACI se encuentran los concretos que emplean agregados de peso normal y pesado, también se incluye el concreto masivo. El ACI 211.1 da las pautas a seguir para el proporcionamiento de las mezclas para estos tipos de concreto.

Concreto normal

Son los concretos que emplean agregados gruesos de peso normal, es el concreto de mayor empleo en la industria de la construcción. Los pesos unitarios de estos agregados gruesos son del orden de 1 440 a 1 760 kg/m³ y la densidad del concreto es de 2 200 a 2 530 Kg/m³, dependiendo del tamaño máximo del agregado empleado y a la cantidad de aire.

Concreto pesado

Es el concreto en el que se emplean agregados pesados como el mineral hierro, la barita, troquelados de hierro, etc. Los valores de la gravedad específica de los agregados gruesos varían entre 3,4 a 7,5, con estos agregados se pueden obtener pesos del concreto de hasta 5 600 kg/m³.

Es empleado principalmente en reactores nucleares e instalaciones similares cuando se requiere la protección de rayos gamma y rayos X.

Concreto masivo

Es el concreto que por su volumen de colocación es suficientemente grande, que ameritan se tomen medidas para controlar la generación del calor durante la hidratación del cemento y el consiguiente cambio volumétrico por pérdida de agua, con el fin de reducir al máximo el agrietamiento. Se pueden emplear agregados de tamaño máximo hasta de 15,2 cm (6"), pero no necesariamente son concretos con agregados de tamaño grande y no se aplica solamente a estructuras masivas de presas o cimentaciones, hay estructuras grandes que pueden ser de gran masa, por lo que la generación de calor de hidratación puede ser importante. Estos concretos se deben diseñar como concreto masivo.

Concreto ACI 211.2

En esta clasificación se encuentra únicamente el concreto confeccionado con agregados de peso liviano, se denomina concreto estructural liviano. En este apartado de ACI se desarrolla el método de diseño para este tipo de concreto.

Concreto estructural liviano

Es el concreto confeccionado con agregados gruesos de peso liviano, según la clasificación del ASTM C-330, la gravedad específica de estos es del orden de 1,0 a 2,0 y la densidad del concreto en estado fresco está en el orden de 1 595 a 2 115 kg/m³, dependiendo de la cantidad de aire incluido o atrapado que tenga el concreto.

Los agregados pueden ser naturales o manufacturados a partir de lutita, arcillas, escoria, etc. Con el empleo de algunos agregados gruesos livianos se puede alcanzar resistencias a la compresión de hasta 340 a 420 kg/cm².

La mayoría de los concretos livianos emplean agregado fino de peso normal.

La norma ASTM C-330 establece al agregado liviano como aquel que tiene un peso seco suelto como máximo de 880 kg/m³, mientras que para el agregado normal, los pesos están entre 1 440 a 1 760 kg/m³. El porcentaje de absorción de los agregados de peso normal oscila entre el 1 y 2%, mientras que los agregados de peso liviano tienen un porcentaje de absorción que está entre el 5 al 15%. Con estos valores, es posible que un metro cúbico de agregado grueso requiera hasta de 150 kg de agua para tener una saturación total.

El concreto con la utilización de agregado de peso liviano, es empleado en la industria de la construcción cuando el peso unitario del concreto disminuye el costo de la obra, también por disponibilidad del agregado, o por una combinación de ambos factores.

Agregados livianos y normales

La principal diferencia entre el agregado grueso de peso normal y el liviano, es su peso suelto y el porcentaje de absorción.

Antecedentes

Geología de tajo Chopo

El tajo Chopo se localiza a 6 Km al norte del cantón de Cañas, provincia de Guanacaste. El cual está ubicado en el cerro del mismo nombre (anexo 1 y figura 1), a una altura de 402 m.s.n.m.

El cerro también es llamado Anunciación, Coronación o Asunción. Consiste en un cono piroclástico con coladas de lava, que cubre un área de 1 Km² aproximadamente.

En realidad, el cerro fue el cono de un volcán extinto de no hace mucho tiempo (dentro de la escala geológica), por lo que debería llamarse volcán Chopo.

Se presume que la edad del “cerro” es del período pleistoceno o más joven (de 40 000 o 10 000 años).

El “cerro” está formado por piroclastos (fragmentos de roca volcánica, producto de una explosión) de varios tamaños, desde cenizas finas (0,5 mm), cenizas gruesas (1-2 mm), lapilli (2-64 mm) y bombas esféricas (de hasta 50 cm), de coloración rojo marrón debido a la presencia de óxido de hierro, formados durante un ciclo de erupciones en presencia de muchos gases que provocaron la oxidación de los componentes ferrosos del magma.

Los piroclastos se encuentran distribuidos en una serie de capas las cuales varían de espesor y granulometría así como de su compactación.

Los piroclastos afloran al norte del cerro, en el sector noreste del cerro, los piroclastos se encuentran soldados y por esta causa el material se encuentra compacto, motivo por el cual, el sector que se está explotado comercialmente es el norte, donde el material se encuentra sin compactación. Esto conlleva a que el único

trabajo necesario por realizar sea el del tamizado del piroclasto para su empleo (Figura 2).

El nombre de Chopo obedece a que uno de los antiguos dueños de la propiedad, era conocido por el sobrenombre de Chopo, de ahí que el “cerro” y el tajo reciban este nombre.

Usos de la piedra del tajo Chopo

El empleo de esta piedra en la industria de la construcción principalmente, ha sido en la construcción y mantenimiento de carreteras y caminos, se remonta a los años 70 hasta la fecha. Es utilizada como material de base, sub-base y para carpeta asfáltica (prácticamente toda la Interamericana Norte), se caracteriza porque cumple satisfactoriamente con la norma CR-77.

Para base y sub-base el material ha sido empleado solo o mezclado con algún otro material de la zona donde se han desarrollado los proyectos con el fin de poder lograr el valor de CBR especificado. Cuando el material ha sido empleado solo, se ha tenido que compactar al 99,5 % de la densidad máxima, para poder lograr el valor mínimo recomendado por la norma CR-77 para el CBR (80%).

Entre los proyectos en que se ha utilizado con éxito en carreteras, se pueden citar las vías correspondientes a :

- a. Cañas-Tilarán
- b. Calles de Arenal
- c. Bagaces-Guayabo
- d. Interamericana Norte
- e. Senara.

De acuerdo con la AASHTO, el material se ha clasificado como A-1-b, A-1-a, según el material con el que se ha mezclado. También se

ha usado como base estabilizada con cemento en algunos proyectos, como el proyecto calles de Liberia.

A continuación se muestran algunos cuadros con los resultados que se han obtenido del material del tajo Chopo en varios proyectos de carreteras.

En el cuadro 2, se muestran los resultados de las pruebas realizados a la base del proyecto Arizona-Peñas Blancas, en la estación 131+760, en la cual se empleó piedra Chopo con otro material de la zona, en una relación de 86% Chopo y 14% Pacífica (material procedente de un tajo de la zona del proyecto), estas pruebas se realizaron en 1973.

Cuadro 2. Proyecto Arizona-Peñas Blancas (86% Chopo-14% Pacífica - muestreo estación 131+760). Uso base (1973)

Característica	Especificación CR-77	Resultado
Densidad máxima (kg/m ³)	--	1,836
Humedad optima (%)	--	12
CBR a 95%	80% min.	102%
Límite líquido	25 máx.	N.P
Límite plástico	6 máx.	N.P
Poder cementante	7 kg/cm ² min	9.3
Abrasión	50 máx.	21%
Tamiz	Pasando graduación C-1 (%)	Pasando (%)
38,1 mm	100	100
19,0 mm	60-90	94
N° 4	30-60	50
N° 40	15-30	22
N° 200	5-15	11.1

Fuente. Laboratorio de materiales del MOPT (Imagen Excel)

En el cuadro 3, se muestran los resultados de las pruebas realizados a la piedra Chopo, para ser empleada como base granular, para el proyecto Interamericana Puerto Moreno.

En este proyecto se empleó la piedra sola, las pruebas fueron realizadas en 1983.

En el cuadro 4, se muestran los resultados de las pruebas realizadas en 1988, a la base de la carretera interamericana norte, entre el cantón de Bagaces y Liberia, estudio realizado para evaluar el estado de la carretera. El muestreo se realizó en la estación 11+425, el material de base empleado en la construcción de esta carretera fue la piedra Chopo

Cuadro 3. Proyecto Interamericana - Puerto Moreno - Uso base granular (1983)

Característica	Especificación CR-77	Resultado
Densidad máxima (kg/m ³)	--	1,709
Humedad optima (%)	--	9.1
CBR a 95%	80% min.	58%
Límite líquido	25 máx.	N.P
Límite plástico	6 máx.	N.P
Clasificación AASHTO	--	A-1-a
Abrasión	50 máx.	20,3%
Tamiz	Pasando graduación B (%)	Pasando (%)
25,4 mm	100	100
19,0 mm	70-100	90
9,5 mm	50-80	84
N° 4	35-60	36
N° 10	25-50	23
N° 40	15-30	14
N° 200	5-15	8

Fuente. Laboratorio de materiales del MOPT (Imagen Excel)

El cuadro 5, refleja los resultados de las pruebas realizados al material de base que se empleó en el Proyecto Calles de Arenal, el material de base empleado en este proyecto fue piedra Chopo y una toba de la zona, en una proporción de 80% Chopo y 20% de toba, los ensayos fueron realizados en 1992.

**Cuadro 4. Proyecto Evaluación Interamericana
Bagaces - Liberia (Muestreo estación 11+425)
Uso base (1988)**

Característica	Especificación CR-77	Resultado
Límite líquido	25 máx.	N.P
Límite plástico	6 máx.	N.P
Clasificación AASHTO	--	A-1-a
Abrasión	50 máx.	--
Tamiz	Pasando graduación B (%)	Pasando (%)
38,1 mm	100	100
25,4 mm	70-100	100
19,0 mm	60-90	94
9,5 mm	45-75	61
N° 4	35-60	35
N° 10	25-50	24
N° 40	10-30	15
N° 200	5-15	8

Fuente. Laboratorio de materiales del MOPT (Imagen Excel)

Actualmente la piedra Chopo está siendo empleada en el mantenimiento (bacheo) de las calles de Cañas y Tilarán, se emplea en mezclas asfálticas en frío.

Como se puede apreciar en los cuadros y en la información indicada, el material del tajo Chopo ha sido empleado por años en la industria de la construcción de carreteras y caminos con resultados satisfactorios. Es importante destacar que se ha logrado mejores resultados cuando la piedra ha sido mezclada con algún otro material de la zona (toba), sobre todo, para lograr los valores de compactación recomendados por la norma CR-77, en estos casos ha superado ampliamente el valor de CBR especificado cuando es empleada como base o sub-base.

**Cuadro 5. Proyecto Calles de Arenal (80 %
Chopo - 20% toba) Uso base (1992)**

Característica	Especificación CR-77	Resultado
Densidad máxima (kg/m ³)	--	1,632
Humedad óptima (%)	--	17
CBR a 95%	80% min.	107%
Límite líquido	25 máx.	N.P
Límite plástico	6 máx.	N.P
Poder cementante	7 kg/cm ² min	9.3
Abrasión	50 máx.	21%
Tamiz	Pasando graduación B (%)	Pasando (%)
50,8 mm		100
38,1 mm	100	97
25,4 mm	70-100	92
19,0 mm	60-90	85
9,5 mm	45-75	63
N° 4	35-60	46
N° 10	25-50	33
N° 40	10-30	19
N° 200	5-15	9.3

Fuente. Laboratorio de materiales del MOPT (Imagen Excel)



Figura 1: Vista panorámica del tajo Chopo y del clasificador (Imagen JPG)



Figura 2: Piedra Chopo. Se muestra el estado natural en que se encuentra la piedra, nótese los diferentes tamaños de la piedra (Imagen JPG).

Resultados

Propiedades de los agregados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados a los agregados, tanto gruesos como finos. El grueso corresponde al material proveniente del tajo Chopo, localizado al norte del cantón de Cañas, provincia de Guanacaste (anexo 1), ubicado en el cerro del mismo nombre, por lo que se le llamó piedra Chopo. Para el caso de la arena, esta se tomó del apilamiento del ICE del Proyecto Geotérmico Miravalles V, la cual proviene del río Pijije del cantón de Bagaces, Guanacaste (anexo 2), por lo que se le llamó arena Pijije.

Los agregados fueron tomados de las fuentes antes indicadas y llevadas al laboratorio de materiales del ICE, ubicado en el Proyecto Geotérmico Miravalles, donde se realizaron las pruebas correspondientes a cada agregado, siguiendo las pruebas establecidas en las

normas ASTM y se compararon los resultados con la norma N° 10854 MEIC, pruebas tendientes a determinar la aceptación de los agregados para el empleo en el diseño de mezclas de concreto.

En vista de las características propias del material del tajo Chopo, fue necesario evaluar la piedra tanto como agregado de peso normal como de peso liviano

Agregado grueso

En el cuadro 6 se presentan los datos de la granulometría para el agregado Chopo, el cual se compara con la norma vigente de Costa Rica del MEIC N° 10854, para agregados de peso normal y con la norma ASTM C 330 para agregados de peso liviano. En las figuras 3 y 4 se muestran gráficamente los resultados obtenidos, en donde se observa que el material cumple con las normas indicadas anteriormente.

Cuadro 6. Granulometría agregado grueso Chopo

Abertura de tamiz		Peso Retenido	Retenido	Retenido acumulado	Pasando	Norma N° 10854-MEIC	Norma ASTM C 330
mm	ASTM	(g)	(%)	(%)	(%)	(cuartilla)	(19 mm a N°4)
25,4	1"	0	0	0	100	100	100
19,05	3/4"	576	5	5	95	90-100	90-100
9,52	3/8"	7,204	68	73	27	20-55	10-50
4,75	N° 4	2,450	23	96	4	0-10	0-15
2,36	N° 8	52	0	96	4	0-5	- -
Peso total retenido		10,282 gr.					
Material más fino que el tamiz de 2,36 mm (N° 8)		382 gr.					
Peso total		10,664 gr.					
Lavado malla N° 200		1.96 %					

(Imagen Excel)

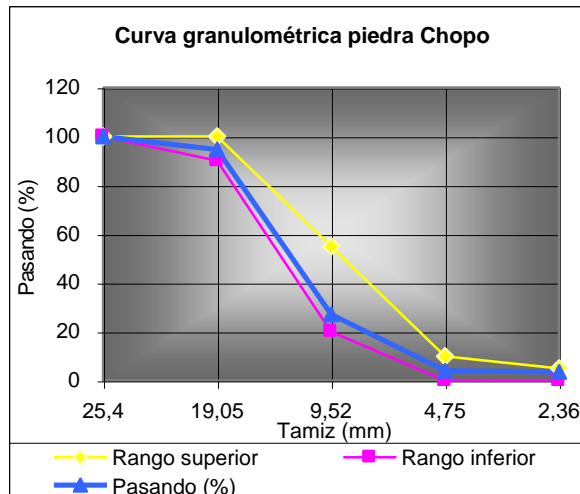


Figura 3: Curva granulométrica agregado grueso Chopo comparada con la norma MEIC-10854, agregado de peso normal. (Imagen Excel)

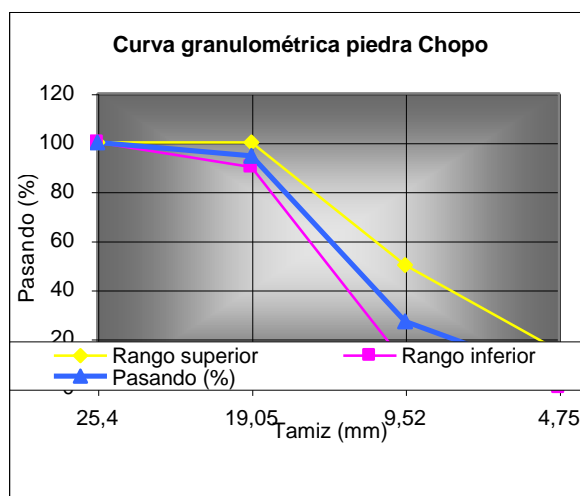


Figura 4: Curva granulométrica agregado grueso Chopo comparada con la norma ASTM C 330, agregado de peso liviano. (Imagen excel)

En el cuadro 7 se presentan los resultados del peso unitario, tanto suelto como envarillado y la abrasión del agregado grueso Chopo, pruebas realizadas siguiendo lo indicado en las normas ASTM C 39 y C131, respectivamente.

En el cuadro 8 se observan los resultados realizados al agregado grueso Chopo, pruebas indicadas en la norma ASTM C 127, correspondiente al porcentaje de absorción y los diferentes valores de gravedad para el agregado grueso.

Cuadro 7. Pesos unitarios y abrasión agregado grueso Chopo

Peso unitario		Abrasión
Suelto (Kg/m ³)	Envarillado (Kg/m ³)	
1,099	1,173	23.48

(Imagen Excel)

Cuadro 8. Gravedad específica y absorción agregado grueso Chopo

Gravedad específica			Absorción
Bruta	Sup.S.S.	Aparente	
1.78	1.95	2.16	10.10

(Imagen Excel)

Agregado Fino

En el cuadro 9 se aprecian los datos de la granulometría para el agregado fino Pijije, prueba realizada siguiendo los lineamientos estipulados en el ASTM C 136. Los datos obtenidos se comparan con la norma vigente de Costa Rica N° 10854 MEIC. Para mayor claridad en los datos, en la figura 5 se muestran gráficamente los resultados obtenidos, en la que se observa que el material está dentro del rango permitido por la norma antes indicada.

Cuadro 9. Granulometría agregado fino Pijije

Abertura de tamiz		Peso Retenido (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasando (%)	Norma N° 10854-MEIC
mm	Alternativa					
9,50	3/8"	1.0	0	0	100	100
4,75	N° 4	31.2	3	3	97	95-100
2,36	N° 8	93.5	8	11	89	80-100
1,18	N° 16	274.5	23	34	66	50-85
0,600	N° 30	248.0	21	55	45	25-60
0,300	N° 50	259.9	22	77	23	10-30
0,150	N° 100	246.3	21	98	2	2-10
0,075	N° 200	9.5	1	99	1	0-5
Peso total retenido		1,164 gr.				
Material más fino que el tamiz de 0,075 mm (N° 200)		9 gr.				
Peso total		1,173 gr.				
Modulo de finura		2.79				
Lavado malla N° 200		2.77 %				

(Imagen Excel)

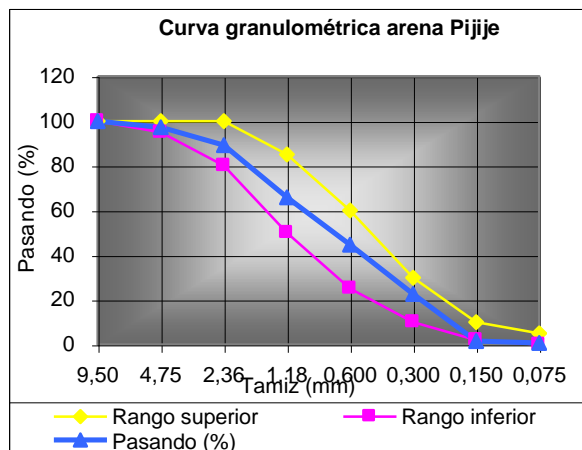


Figura 5: Curva granulométrica agregado fino arena Pijije comparada con la norma MEIC-10854

En el cuadro 10 se presenta el resultado de la prueba ASTM C 29, peso unitario del agregado fino, arena Pijije

Cuadro 10. Peso unitario y abrasión agregado fino Pijije

Peso unitario		Abrasión
Suelto (Kg/m ³)	Envarillado (Kg/m ³)	
1,375	--	--

(Imagen Excel)

En el cuadro 11 se muestran los resultados del porcentaje de absorción y los diferentes valores de gravedad para el agregado fino Pijije, prueba realizada siguiendo lo indicado en la norma ASTM C 128.

Cuadro 11. Gravedad específica y absorción agregado fino Pijije

Gravedad específica			Absorción
Bruta	Sup.S.S	Aparente	
2.32	2.44	2.64	4.91

(Imagen Excel)

Para mejor comprensión, en el cuadro 12 se han agrupado las principales propiedades de los agregados, tanto de los finos como de los gruesos, las cuales cumplen con la norma vigente en Costa Rica N° 10854 MEIC.

Cuadro 12. Principales propiedades agregados grueso y fino

Propiedad		Unidad	Piedra Chopo	Arena Pijije
Peso unitario	Suelto	Kg/m ³	1,099	1,375
	Envarillado	Kg/m ³	1,173	- -
Gravedad específica	Bruta	- -	1.78	2.32
	Sup.S.S.	- -	1.95	2.44
	Aparente	- -	2.16	2.66
Abrasión		%	23.48	- -
Absorción		%	10.10	4.91
Sanidad		%	1.98	8.13
Impurezas orgánicas		- -	- -	No
Modulo de finura		- -	- -	2.79
Sustancias deletéreas				
Lavado malla N° 200		%	1.96	2.77
Partículas friables		%	1.70	3.00

(Imagen Excel)

Diseño y resistencia

A partir de las pruebas realizadas a los agregados, se procedió con el diseño de las mezclas para las resistencias a la compresión en estudio (175, 210 y 280 kg/cm²), aplicando los dos métodos establecidos en el ACI 211 (concreto normal ACI 211.1 y concreto estructural liviano ACI 211.2), tendientes a determinar cual de los dos métodos se aplica mejor al agregado Chopo.

El cuadro 13 resume los datos obtenidos en la primer batida de prueba, la cual fue de 0,02 m³ (Figura 6). Se presentan los datos de los dos

agregados en condición saturada, requerimiento de agua y cemento para el volumen indicado. Con estos resultados se procedió, cuando correspondió, a realizar los ajustes necesarios que permitieran obtener el revenimiento requerido, para este estudio correspondió entre 7,6 a 10,0 cm. En vista de que los diseños se realizaron en dos días, los valores de humedad presentan una variación en los agregados.

**Cuadro 13. Comparación diseño teórico de concreto normal y liviano
(Batida de prueba, agregados saturados)**

Descripción	Unidad	Resistencia					
		175 kg/cm ²		210 kg/cm ²		280 kg/cm ²	
		ACI 211.1 peso normal *	ACI 211.2 peso liviano **	ACI 211.1 peso normal **	ACI 211.2 peso liviano **	ACI 211.1 peso normal *	ACI 211.2 peso liviano *
Agua	kg	3.03	3.01	3.01	3.05	3.12	3.14
Cemento	kg	5.90	5.77	6.5	6.38	7.92	7.79
Chopo	kg	16.37	18.43	16.32	18.42	16.37	18.48
Arena	kg	13.69	11.47	13.26	10.91	11.93	9.35
Revenimiento	cm	9.0	8.0	4.5	9.0	6.0	4.0
Peso fresco	kg/m ³	2,120	2,121	2,137	2,130	2,129	2,125
Volumen de batida	m ³	0.02					

* Humedad Chopo 12.5%, arena 10.7%

** Humedad Chopo 12.2%, arena 11.5%

(Imagen Excel)

El cuadro 14 muestra el proporcionamiento corregido para un metro cúbico de concreto, para las diferentes resistencias. Al igual que el cuadro 13, los pesos de los agregados están en condición saturada. Con base en estos datos se procedió a la preparación de las mezclas, 0,06 m³ de concreto por cada diseño (Figura 7), con las cuales se prepararon los cilindros para ser

fallados a compresión a los 3, 7, 14 y 28 días, ocho por cada resistencia y por cada método empleado, para un total de 48 cilindros (Figura 8). También se presentan los resultados del revenimiento y peso del concreto fresco para cada diseño preparado.

El cuadro 15, se muestran los

**Cuadro 14. Comparación diseño corregido concreto de peso normal y liviano
(Agregados saturados)**

Descripción	Unidad	Resistencia					
		175 kg/cm ²		210 kg/cm ²		280 kg/cm ²	
		ACI 211.1 peso normal *	ACI 211.2 peso liviano **	ACI 211.1 peso normal **	ACI 211.2 peso liviano **	ACI 211.1 peso normal *	ACI 211.2 peso liviano *
Agua	kg	152.00	150.00	150	153	154	160
Cemento	kg	294.00	289.00	335	319	404	406
Chopo	kg	819.00	921.00	892	921	886	1013
Arena	kg	684.00	574.00	761	546	686	546
Revenimiento	cm	9.5	9.5	8.5	10.0	10.0	10.5
Peso fresco	kg/m ³	2,118	2,128	2,138	2,122	2,123	2,118
Volumen de batida	m ³	1.00					

* Humedad chopo 12.5%, arena 10.7%

** Humedad chopo 12.2%, arena 11.5%

(Imagen Excel)

mismos datos del cuadro 14, con los agregados en condición seca y en el cuadro 16 se muestran los proporcionamientos por volumen de los

componentes de un metro cúbico de concreto para los diseños realizados.

Cuadro 15. Comparación diseño corregido de concreto de peso normal y liviano (Agregados secos)

Descripción	Unidad	Resistencia					
		175 kg/cm ²		210 kg/cm ²		280 kg/cm ²	
		ACI 211.1 peso normal	ACI 211.2 peso liviano	ACI 211.1 peso normal	ACI 211.2 peso liviano	ACI 211.1 peso normal	ACI 211.2 peso liviano
Agua	kg	205.00	202.00	211	202	209	210
Cemento	kg	295.00	289.00	335	319	404	406
Chopo	kg	728.00	820.86	795.01	820.86	787.56	900.44
Arena	kg	617.89	514.80	682.51	489.69	619.69	493.22
Revenimiento	cm	9.5	9.5	8.5	10.0	10.0	10.5
Peso fresco	kg/m ³	2,118	2,128	2,138	2,122	2,123	2,118
Volumen de batida	m ³	1.00					

(Imagen Excel)

Cuadro 16. Comparación diseño corregido de concreto de peso normal y liviano (Agregados secos por volumen)

Descripción	Unidad	Resistencia					
		175 kg/cm ²		210 kg/cm ²		280 kg/cm ²	
		ACI 211.1 peso normal	ACI 211.2 peso liviano	ACI 211.1 peso normal	ACI 211.2 peso liviano	ACI 211.1 peso normal	ACI 211.2 peso liviano
Agua	m ³	0.205	0.202	0.211	0.202	0.209	0.210
Cemento	m ³	0.311	0.304	0.353	0.336	0.425	0.427
Chopo	m ³	0.621	0.700	0.678	0.700	0.671	0.768
Arena	m ³	0.449	0.374	0.496	0.356	0.451	0.359
Revenimiento	cm	9.5	9.5	8.5	10	10	10.5
Peso fresco	kg/m ³	2118	2128	2138	2122	2123	2118
Volumen de batida	m ³	1					

(Imagen Excel)



Figura 6: Pesaje del cemento para la preparación de las mezclas. (Imagen JPG)



Figura 7: Preparación de una de las mezclas. (Imagen JPG)



Figura 8: Preparación de cilindros con concreto Chopo (Imagen JPG).



Figura 9: Cilindros de concreto Chopo en la cámara húmeda (Imagen JPG)

Resistencia a la compresión

En el cuadro 16, se presentan los resultados obtenidos de la falla a la compresión a la que fueron sometidos los cilindros de concreto de cada resistencia (Figuras 9, 10 y 11), según el método de diseño utilizado y de acuerdo con la edad de curado de cada muestra, se presenta también los valores esperados de resistencia de acuerdo con la edad de curado de cada muestra.

En las figuras de la 12 a 17 se presentan gráficamente estos valores, para lo cual se tomaron los valores promedios de resistencia para realizar las curvas de desarrollo de resistencia para cada método de diseño empleado.



Figura 10: Falla a compresión de uno de los cilindros preparados. (Imagen JPG)

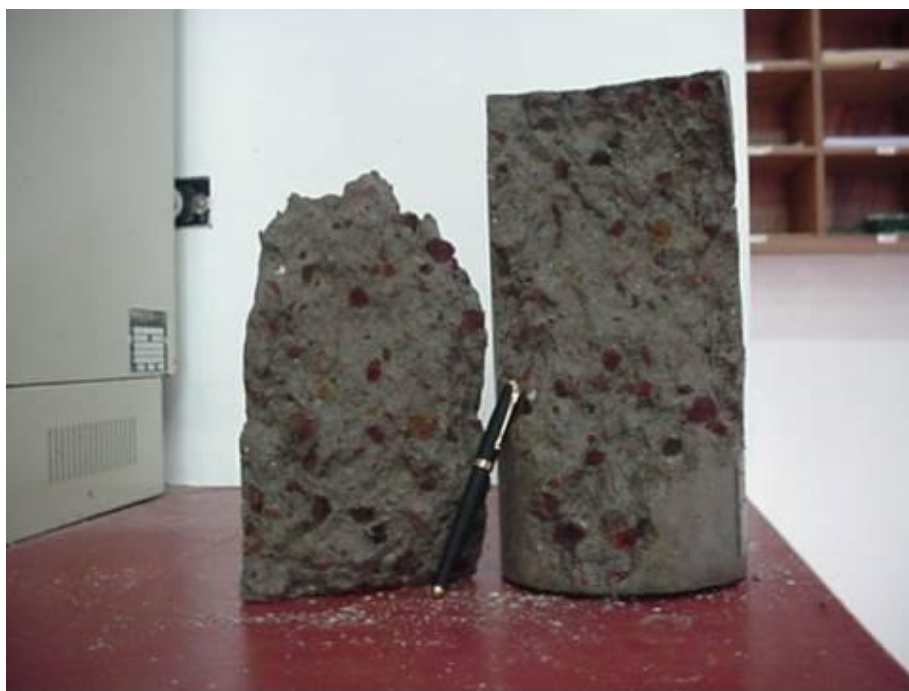


Figura 11: Muestra de uno de los cilindros fallados, nótese el color rojizo del agregado grueso Chopo. (Imagen JPG)

Cuadro 17. Resistencia obtenida de diseño de concreto de peso normal y liviano

Diseño		Cilindro	Resistencia obtenida (kg/cm ²)							
			Tiempo de falla en días							
			ACI 211.1 agregado peso normal				ACI 211.2 agregado peso liviano			
			3	7	14	28	3	7	14	28
Resistencia de	175 kg/cm ²	N° 1	68	113	187	221	86	136	197	252
		N° 2	79	114	163	242	85	134	185	254
		Promedio	73.5	113.5	175	231.5	85.5	135	191	253
		Programada	61.25	113.75	157.5	175	61.25	113.75	157.5	175
	210 kg/cm ²	N° 1	83	150	232	256	82	143	190	262
		N° 2	88	137	230	267	83	141	190	260
		Promedio	85.5	143.5	231	261.5	82.5	142	190	261
		Programada	73.5	136.5	189	210	73.5	136.5	189	210
	280 kg/cm ²	N° 1	134	189	265	323	151	232	287	325
		N° 2	129	194	265	322	150	193	293	345
		Promedio	131.5	191.5	265	322.5	150.5	212.5	290	335
		Programada	98	182	252	280	98	182	252	280

(Imagen Excel)

En la figura 12 se compara gráficamente la evolución de la resistencia de 175 kg/cm², empleando el diseño ACI 211.1 (concretos con agregados de peso normal), mientras que en la figura 13 se presenta la misma resistencia, en esta ocasión empleando el método de diseño ACI

211.2 (concretos en los que se emplea agregado de peso liviano), en ambas ocasiones se compara con la proyección teórica de la resistencia. En ambas figuras se observa que los valores de las curvas reales superan los de las programadas.

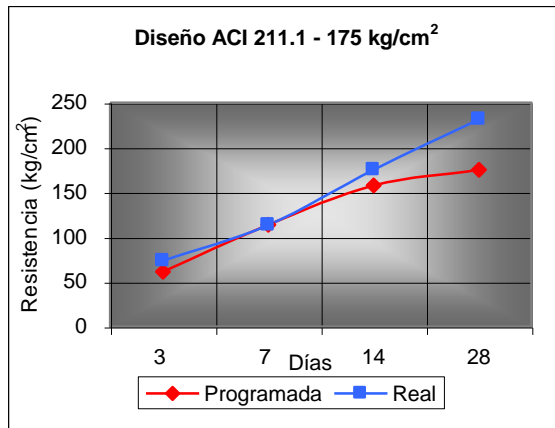


Figura 12: Curva de desarrollo de resistencia real vrs teórica, diseño ACI 211.1, diseño 175 kg/cm². (Imagen Excel)

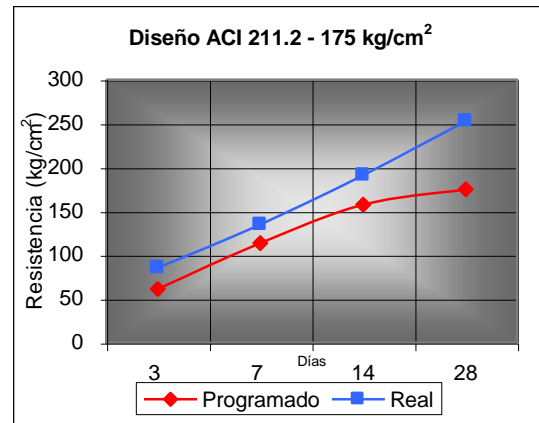


Figura 13: Curva de desarrollo de resistencia real vrs teórica, diseño ACI 211.2, diseño 175 kg/cm². (Imagen Excel)

En la figura 14 se compara gráficamente la evolución de la resistencia de 210 kg/cm², empleando el diseño ACI 211.1 (concretos con agregados de peso normal), mientras que en la figura 15 se presenta la misma resistencia, en esta ocasión empleando el método de diseño

ACI 211.2 (concretos en los que se emplea agregado de peso liviano), en ambas ocasiones se compara con la proyección teórica de la resistencia. Se observa que ocurre lo mismo que las figuras anteriores, los valores de las curvas reales superan los valores de las programadas.

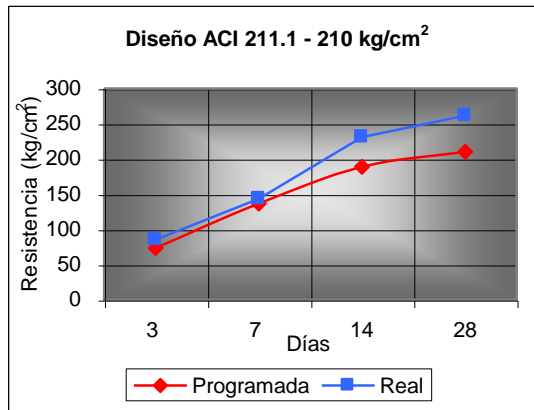


Figura 14: Curva de desarrollo de resistencia real vrs teórica, diseño ACI 211.1, diseño 210 kg/cm². (Imagen Excel)

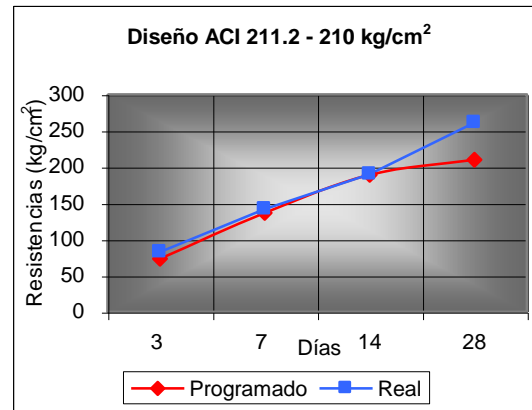


Figura 15: Curva de desarrollo de resistencia real vrs teórica, diseño ACI 211.2, diseño 210 kg/cm². (Imagen Excel)

En la figura 16 se compara gráficamente la evolución de la resistencia de 280 kg/cm², empleando el diseño ACI 211.1 (concretos con agregados de peso normal), mientras que en la figura 17 se presenta la misma resistencia, en esta ocasión empleando el método de diseño ACI

211.2 (concretos en los que se emplea agregado de peso liviano), en ambas ocasiones se compara con la proyección teórica de la resistencia. Al igual que las curvas anteriores, se aprecia que los valores de las curvas reales superan los valores de las curvas programadas.

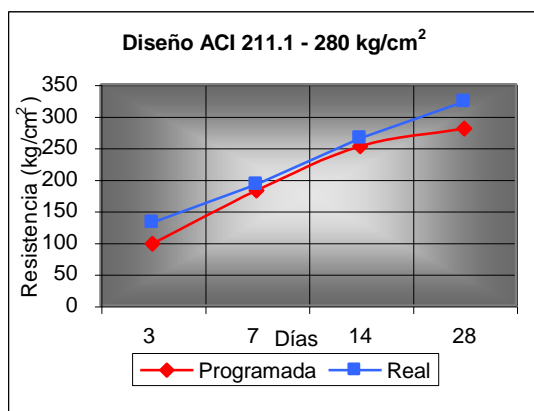


Figura 16: Curva de desarrollo de resistencia real vrs teórica, diseño ACI 211.1, diseño 280 kg/cm². (Imagen Excel)

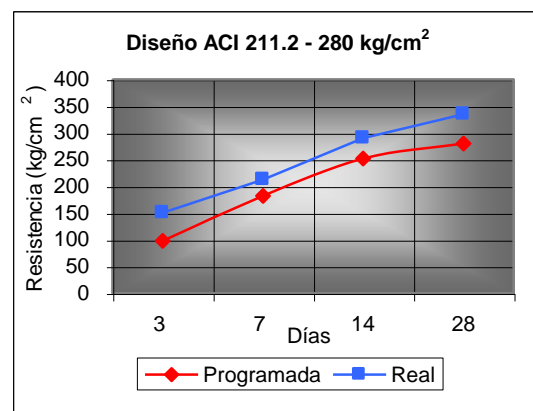


Figura 17: Curva de desarrollo de resistencia real vrs teórica, diseño ACI 211.2, diseño 280 kg/cm². (Imagen Excel)

Costo del concreto

En el cuadro 18 se muestra la comparación del costo del concreto de resistencia 210 kg/cm² que emplea la ICE, contra el costo del concreto de la

misma resistencia empleando el agregado Chopo, los costos empleados son unitarios, y se tomó el costo actual de los agregados, puestos en los tajos respectivos.

Cuadro 18. Comparación costo por m³ concreto ICE y concreto Chopo de 210 kg/cm²

Descripción	Diseño ICE				Diseño Chopo ACI 211.1				Diseño Chopo ACI 211.2			
	Cant.	Precio	Precio acarreo	Total	Cant.	Precio	Precio acarreo	Total	Cant.	Precio	Precio acarreo	Total
Cemento (kg)	320	44.08	0	14,105.60	335	44.08	0	14,766.80	319	44.08	0	14,061.52
Agregado grueso (m ³)	0.640	4011.5	3388	4,735.68	0.678	2712	1540	2,881.82	0.700	2712	1540	2,975.51
Agregado fino (m ³)	0.620	5500	0	3,410.00	0.496	5500	0	2,730.04	0.356	5500	0	1,958.74
Costo total unitario				22,251.28				20,378.67				18,995.78

(Imagen Excel)

En el cuadro 19 se presenta la comparación del costo unitario del concreto Chopo, resistencia 210 kg/cm² y el empleado en la zona de Cañas.

Para ello se utilizó los costos de los agregados (fino y grueso) y el cemento que se consigue en los comercios de este cantón.

Cuadro 19. Comparación costo por m³ concreto Cañas y concreto Chopo de 210 kg/cm²

Descripción	Diseño Cañas				Diseño Chopo ACI 211.1				Diseño Chopo ACI 211.2			
	Cant.	Precio	Precio acarreo	Total	Cant.	Precio	Precio acarreo	Total	Cant.	Precio	Precio acarreo	Total
Cemento (kg)	340	49.1	0	16,694.00	335	49.1	0	16,448.50	319	49.1	0	15,662.90
Agregado grueso (m ³)	0.890	5985	0	5,326.65	0.678	2712	833.33	2,402.87	0.700	2712	833.33	2,480.99
Agregado fino (m ³)	0.540	5300	0	2,862.00	0.496	5300	0	2,630.77	0.356	5300	0	1,887.52
Costo total unitario				24,882.65				21,482.14				20,031.41

(Imagen Excel)

Análisis de los resultados

Tradicionalmente el agregado proveniente del tajo Chopo ha sido empleado con buenos resultados en la industria de la construcción, para el mantenimiento y construcción de carreteras y caminos, como se pueden ver en los cuadros del 2 al 5, principalmente debido a su bajo costo producto de las condiciones propias del tajo, que lo único que requiere para su empleo es el tamizado, ya que el material se encuentra sin compactación. Por tal motivo, se estudió el material para ser empleado como agregado grueso en el diseño de mezclas de concreto para la industria de la construcción.

Como lo muestran todos los datos de las cuadros y figuras de los resultados, el agregado grueso proveniente del tajo Chopo, cumple a cabalidad con todos los requisitos establecidos en las normas, tanto en la N° 10854 MEIC como las de la ASTM aplicables para el empleo de este material en el diseño de mezclas de concreto. Igualmente la arena Pijije estudiada está cumpliendo satisfactoriamente con las normas antes indicadas.

Agregado grueso

Como se puede observar en el cuadro 6 y en las figuras 3 y 4, el agregado Chopo cumple satisfactoriamente con los requisitos establecidos en las normas, tanto para agregado de peso normal, el cual se clasifica como una cuartilla, como para el agregado de peso liviano, en el que se clasifica como agregado de tamaño 19,05 mm a 4,75 mm (3/4" a N° 4). A partir del cuadro 6 se deduce que el tamaño máximo del agregado es 19,05 mm (3/4") ya que en este tamiz se encuentra retenido entre el 5 al 10% del material, que para este caso es de un 5%.

De las figuras 3 y 4 se puede apreciar que el agregado tiende a acercarse más al rango del límite inferior, lo que significa que el agregado

es de una tendencia un poco gruesa, a excepción del tamiz 4,75 mm (N° 8) en la granulometría de agregado de peso normal, aquí el agregado se acerca más al límite superior, por lo que en este punto el material es más fino. Se puede notar también que las curvas son suaves, tanto en el agregado liviano como en el de peso normal.

En vista de que el agregado grueso Chopo, presenta una gravedad específica de entre 1 y 2 y un porcentaje de absorción de 10,1% (datos de cuadros 8 y 12), se puede considerar, según la literatura (ACI 211.2), como agregado grueso de peso liviano. Sin embargo, al observar la norma ASTM C 330, esta establece que los agregados gruesos con pesos unitarios menores a 880 kg/m³ son los que se consideran agregados de peso liviano. Al tener el agregado Chopo un peso unitario suelto de 1 099 kg/m³ y de 1 173 kg/m³ en condición seco envarillado (cuadro 7 y 12), no clasificaría como agregado de peso liviano; sin embargo, como lo establece Muñoz, en su libro **Componentes principales de las mezclas de concreto** (1998), al clasificar los agregados de acuerdo a su peso, establece que los agregados livianos son aquellos con un peso unitario seco menor a 1 120 kg/m³. Desde este punto de vista el agregado grueso Chopo se podría clasificar como de peso liviano. Igualmente Ramírez en su proyecto **Características de los agregados nacionales: resto del país** (1994), establece que los agregados muy livianos son aquellos con una gravedad específica entre 0,40 y 1,24 y livianos los agregados con gravedad entre 2,0 y 2,60, al tener el agregado Chopo una gravedad específica de 1,78 (cuadro 12), se puede clasificar como agregado liviano, según las referencias citadas.

Para efectos del proyecto fue importante evaluar el agregado clasificándolo como liviano y normal, lo cual permitió evaluar cuál de los dos métodos de diseños establecidos en el ACI 211, se ajusta mejor al agregado Chopo.

En el cuadro 7 se puede observar que el porcentaje de abrasión es de un 23,48%, contra un 50% que establece la norma N° 10854 MEIC, de acuerdo con este dato se excede en más de un 100% lo especificado.

Como se indicó anteriormente, el porcentaje de absorción es de 10,1%, lo que significa que para un metro cúbico de agregado en una mezcla de concreto, se requiere 101 kg más de agua adicional al agua de mezcla.

Por otra parte, en el cuadro 12 se muestra el valor obtenido de sanidad, el cual es de 1,98%, lo que hace, al agregado Chopo, muy resistente a los cambios de volumen cuando está sujeto a condiciones extremas. En cuanto a partículas friables presenta un 1,78% contra un 5% que establece la norma vigente de Costa Rica.

En el mismo cuadro, se puede ver que el porcentaje de finos que pasan la malla N° 200 es de 1,96, mientras que la norma establece como máximo 1% y 2% para agregados provenientes de quebrador, este exceso de finos puede generar un aumento en la cantidad de cemento requerido, ya que se tendrá una mayor superficie específica a cubrir por la pasta.

Así mismo, la forma irregular del agregado, puede ayudar a la adherencia de la pasta del concreto y colaborar con la resistencia del concreto preparado.

Comparando las principales características del agregado Chopo, con el agregado usado por el ICE (anexo5) resulta que este último es 225 kg más pesado que el Chopo, la gravedad específica bruta del agregado ICE es de 2,66, mientras que el Chopo tiene 1,78. En cuanto al porcentaje de absorción el agregado Chopo tiene 10,1% contra 1,75 % del agregado del ICE.

Agregado fino

Al igual que el agregado grueso cumple satisfactoriamente con los requisitos establecidos en la norma N° 10854 MEIC y las aplicables del ASTM.

En el cuadro 9 y en la figura 5, se presentan los resultados del análisis granulométrico para la arena Pijije, se ajusta a la norma. En el cuadro citado se puede observar el valor del módulo de finura, según estos datos

está dentro del parámetro establecido en la norma vigente de Costa Rica, que debe estar en el rango de 2,3 a 3,1.

En cuanto al peso suelto, este es de $1\,375\text{ kg/m}^3$, es decir 275 kg más pesado por metro cúbico que el agregado Chopo.

Este agregado fino presenta un porcentaje de absorción de 4,91%, por lo que un metro cúbico de este agregado para ser empleado en una mezcla de concreto requerirá de 49,1 kg de agua adicional al agua de mezcla.

Al realizar la prueba de impurezas orgánicas, el color obtenido de la muestra es más claro que al color patrón, por lo que la concentración de impurezas orgánicas es menor a 500 p.p.m., que no serán perjudiciales para el empleo de esta arena, en mezclas de concreto.

El valor de sanidad es inferior al establecido por la norma vigente de Costa Rica, la cual establece que la resistencia a la desintegración mediante el empleo de sulfato de sodio a cinco ciclos, no deberá ser mayor de un 15%, según el procedimiento establecido en la norma ASTM C 88; el valor obtenido en esta prueba para la arena Pijije fue de un 8,17%, para mayor información véase los cuadros 11 y 12.

En cuanto al porcentaje de partículas friables o desmenuzables, el valor obtenido es el máximo permitido en la norma, la cual establece como máximo un 3% (el resultado de esta prueba se indica en el cuadro 12).

El porcentaje de material más fino que el tamiz N° 200, es de 2,77%, mientras que la norma establece como máximo un 3%.

Primer diseño

En el cuadro 13 se muestran los resultados del primer diseño de prueba de $0,02\text{ m}^3$ realizado a partir de los datos obtenidos, aplicando lo estipulado en el ACI 211.1 y 211.2.

Además, se presenta una variación en el porcentaje de humedad de los agregados, ya que las mezclas fueron preparadas en dos días diferentes y los materiales tenían diferente porcentaje de humedad.

Los agregados empleados estuvieron en condición saturada, para lo cual se les agregó agua con 24 horas de anticipación, esto con el fin de que el agua de absorción fuese tomada por

los poros permeables de los agregados. Dicha operación se logró satisfactoriamente ya que los porcentajes de humedad obtenidos de los agregados superaron los porcentajes de absorción. Esto indica que los agregados tenían un exceso de agua, la cual se le restó al agua de mezcla calculada. Se procedió de esta forma debido a que el porcentaje de absorción de los agregados es muy alto, principalmente el del grueso (ver cuadro 12). De estar los agregados en condición seca o con los poros permeables, parcialmente llenos, al realizar la mezcla no se garantizaría que el agua de absorción, que no es agua de mezcla, sea absorbida totalmente por los agregados, principalmente por el poco tiempo que estarían en contacto; en consecuencia, pasarían a formar parte del agua de mezcla, ocasionando con ello un aumento en la relación agua-cemento y por consiguiente, una disminución en los valores de resistencia finales de los diseños preparados.

Para el diseño de 175 kg/cm^2 , tanto para el método de diseño ACI 211.1 como el ACI 211.2, no fue necesario realizar correcciones, ya que la cantidad de agua calculada fue tal que el revenimiento obtenido fue de 9 cm y 8 cm respectivamente, los cuales se encuentran dentro del rango de diseño establecido, el cual fue de 7,6 cm a 10 cm. Igualmente ocurrió con el diseño de 210 kg/cm^2 , para el método ACI 211.2, en este diseño el valor de revenimiento medido fue de 9 cm.

Para los otros diseños fue necesario realizar correcciones por agua, ya que los valores de revenimiento obtenidos no se encontraban dentro del rango establecido. Para estos casos fue necesario aplicar lo indicado en la literatura (ACI 211), la cual cita que en aquellos casos en que el revenimiento obtenido, sea menor o mayor al estimado en el diseño, se debe incrementar o reducir en 2 kg la cantidad de agua por metro cúbico de concreto, para cada centímetro de aumento o disminución del revenimiento. Luego de realizar eso se procedió con la corrección de la cantidad de cemento, con el fin de mantener constante la relación agua cemento requerida según cada diseño, también se realizaron los ajustes correspondientes a los pesos de los agregados gruesos y finos (Apéndice 1).

En el diseño de 210 kg/cm^2 ACI 211.1, el valor de revenimiento de la primer batida de prueba fue de 4,5 cm, en este caso se hizo necesario adicionar a la mezcla 6 kg más de

agua y realizar las correcciones de cemento y agregados. Para las batidas de prueba del diseño de 280 kg/cm^2 aplicando los dos métodos del ACI, se obtuvieron 6 y 4 cm de revenimiento, el primer valor para el diseño ACI 211.1 y el segundo para el diseño ACI 211.2, por lo que se tuvo que agregar 4 y 8 kg por metro cúbico de concreto, con el fin de lograr el valor de revenimiento de diseño.

Diseño corregido

A pesar de que en algunos diseños no se aplicó correcciones, los valores de revenimiento medidos superaron los valores de la primer batida de prueba; sin embargo, estuvieron dentro del rango de diseño establecido (cuadro 14). Igualmente los diseños a los que se les aplicó corrección de agua, el valor de revenimiento no fue el esperado, pero se encontraron dentro del parámetro de diseño establecido a excepción del diseño de 280 kg/cm^2 ACI 211.2 el cual dio 10,5 cm, pero por la forma en que este se deformó cuando se levantó el cono. Presentó partes que estaban dentro de rango de diseño, por lo que se decidió dar por buena la mezcla y preparar los cilindros de prueba.

Para el diseño 175 kg/cm^2 (por los dos métodos de diseño) el 27% del peso de la mezcla corresponde a la pasta, mientras que el restante 73% son los agregados (gruesos y finos). Para el diseño ACI 211.1 se tiene un 39% de agregado grueso y un 33% de fino. Por su parte el diseño ACI 211.2 tiene un mayor porcentaje de agregado grueso (45%) y un menor porcentaje de finos (28%), por lo que la cantidad de pasta que se requiere para cubrir la superficie específica de los finos será menor. Sin embargo, la cantidad de pasta para llenar los espacios vacíos entre las partículas gruesas será mayor. El porcentaje de cemento para los dos métodos de diseños es de un 16%.

El diseño 210 kg/cm^2 (por los dos métodos), presenta un comportamiento en cuanto a porcentajes de pasta y agregados, igual al diseño anterior y en cuanto a los porcentajes de agregado grueso y fino, también presenta un comportamiento muy similar al diseño de 175 kg/cm^2 .

En el diseño 280 kg/cm^2 , para el método ACI 211.1, un 30% del peso corresponde a la

pasta y un 70% a los agregados, mientras que en el diseño ACI 211.2, la pasta representa un 31% y los agregados un 69%. Al igual que los dos diseños anteriores, el porcentaje de agregado grueso se mantiene constante para cada método de diseño, 39% para el ACI 211.1 y 45% para el ACI 211.2. En ambos diseños hay una disminución del porcentaje agregado fino, que es compensada con un incremento en el porcentaje de pasta en la mezcla, producto de la mayor cantidad de cemento requerido por el diseño en el diseño.

El porcentaje de agregado grueso se mantiene constante en cada método de diseño mientras el fino se reduce. Esto se debe al mismo método del diseño, donde los gruesos y el cemento se incrementan con la adición del agua y al ser calculado el proporcionamiento por un metro cúbico o por el peso de un metro cúbico de concreto, la cantidad que se reduce tiene que ser la de los finos. Por esta razón el porcentaje de gruesos para el diseño, considerando el agregado grueso Chopo de peso normal (ACI 211.1), es de un 39% para todas las resistencias calculadas, mientras que si se valora el agregado Chopo como agregado de peso liviano el porcentaje de gruesos representa un 45%, también para las tres resistencias en estudio.

Resistencia del concreto

En el cuadro 16 se puede apreciar que la resistencia a la compresión de los cilindros fallados, a las diferentes edades de curado, de cada muestra de los dos métodos empleados, superan los valores esperados. Esto se puede ver gráficamente en las figuras 12 a 17. En el cuadro 16 se tomaron como los valores esperados, un porcentaje de la resistencia diseñada a los 28 días. Para los 3 días se tomó un 35%, a los 7 un 65%, para los 14 un 95% y para los 28 días un 100%.

En el caso del diseño 175 kg/cm² por el método ACI 211.1, la resistencia en promedio a los tres días es de 73,5 kg/cm², dato que es 12,25 kg/cm² mayor al valor esperado, a los 7 días el valor de resistencia en promedio tiende a disminuir y llega a ser menor en 0,25 kg/cm² al

valor esperado para esta edad de curado. Al fallar los cilindros a los 14 días se ve un incremento importante en la resistencia a la compresión, se obtiene en promedio 175 kg/cm², valor que es el esperado a los 28 días. Al fallar los cilindros a la edad antes citada, la resistencia a la compresión fue de 321 kg/cm², superando en 56 kg/cm² el valor de diseño, como se puede ver en la figura 12.

En la figura 13 se presentan los resultados para la resistencia de 175 kg/cm² por el método ACI 211.2, en la que se observa un comportamiento similar a esta misma resistencia, con el método de diseño ACI 211.1. A los 3 días, el valor de resistencia supera el esperado, pero a los 7 días se produce una disminución (siempre superando el valor esperado), a los 14 días se incrementa nuevamente y supera el valor proyectado en 33,5 kg/cm², llegando a superar la resistencia esperada a los 28 días. Al fallar los cilindros a la edad antes citada, se obtiene una resistencia en promedio de 253 kg/cm², siendo 78 kg/cm² superior al valor de diseño.

Es importante indicar también que para el diseño de resistencia 210 kg/cm² por el método ACI 211.1 mostrado en la figura 14, presenta un comportamiento similar al diseño para 175 kg/cm². Por este mismo método de diseño, a los tres días de curado tiene una resistencia de 85,5 kg/cm² en promedio, se supera en 12 kg/cm² la resistencia esperada; a los 7 días, la resistencia es en promedio 7 kg/cm², arriba del valor esperado; a los 14 días se ve un incremento importante en la resistencia, equivalente a 231 kg/cm² en promedio, dato que supera en 10 kg/cm² el valor esperado para la resistencia a los 28 días, los cilindros fallados en el tiempo de curado antes indica tienen en promedio una resistencia de 261 kg/cm², valor que supera en 51 kg/cm² el valor de diseño.

Con respecto al método de diseño ACI 211.2 para 210 kg/cm² de resistencia, los valores obtenidos a los 3, 7 y 14 días son muy similares a los esperados, siempre están por arriba de ellos, a los 3 días se tiene 9 kg/cm² en promedio de más, a los 7 es de 5,5 kg/cm² en promedio superior al esperado y a los 14 el promedio es 1 kg/cm² por arriba del valor esperado, sin embargo, los cilindros fallados a los 28 días tienen una resistencia a la compresión en promedio de 261 kg/cm², valor igual al del método de diseño ACI 211.1.

En relación con la resistencia de 280 kg/cm^2 por el diseño ACI 211.1 mostrado en la figura 16, se tiene a los 3 días una resistencia en promedio de $131,5 \text{ kg/cm}^2$ que es $33,5 \text{ kg/cm}^2$ superior al valor esperado para este tiempo de curado; a los 7 días, el promedio de resistencia medido fue de $191,5 \text{ kg/cm}^2$, con un $9,5 \text{ kg/cm}^2$ por arriba del valor esperado de resistencia, a los 14 días el valor de resistencia en promedio, es de 265 kg/cm^2 dato que supera en 13 kg/cm^2 el valor proyectado para esta edad de curado, a los 28 días el promedio de resistencia es de 322 kg/cm^2 , con lo cual se supera en 42 kg/cm^2 el valor de resistencia calculado.

Para esta misma resistencia, pero para el método ACI 211.2 (figura 17), la resistencia promedio a los 3 días es de 150 kg/cm^2 superando en $52,5 \text{ kg/cm}^2$ la resistencia esperada a esta edad de curado; a los siete días el valor promedio de resistencia es de $212,5 \text{ kg/cm}^2$ y a los 14 el promedio de resistencia medido es de 290 kg/cm^2 , se superan en 10 kg/cm^2 el valor esperado para los 28 días de curado, período en que se logró un valor promedio de resistencia de 335 kg/cm^2 .

Cabe aclarar que el comportamiento de resistencia a la compresión en las curvas de desarrollo para los dos métodos de diseño aplicados, tienen una tendencia similar, se supera los valores de resistencia esperados en los diferentes tiempos de curado, logrando a los 28 días, hasta en un 45% para el diseño, con el agregado grueso de peso liviano para la resistencia de 175 kg/cm^2 ; así mismo, un 32% para la misma resistencia, pero usando el agregado grueso como de peso normal.

Al observar la tabla 17, se nota que el método ACI 211.2 para el diseño de 175 y 280 kg/cm^2 , es el que mayor resistencia se obtiene en los diferentes tiempos de curado de los cilindros fallados, mientras que para el diseño de 210 kg/cm^2 la mayor resistencia se logra con el método ACI 211.1. Sin embargo, la resistencia a los 28 días es prácticamente igual por los dos métodos de diseño.

Por otra parte, el empleo del diseño ACI 211.2 requiere de mayor cantidad de agregado grueso, lo que hace que la mezcla sea menos trabajable debido al incremento de la piedra.

En vista de que el agregado Chopo cumple con las normas vigentes, para su empleo en el diseño de mezclas de concreto, sería conveniente realizar otros estudios tendientes a

realizar varias combinaciones de agregados gruesos y finos, con el fin de determinar su mejor proporción, máxime con los valores de resistencia obtenidos, que inclusive superan el valor de resistencia con el factor de seguridad aplicado para cada diseño preparado.

En vista de la forma de las curvas de desarrollo de resistencia (superaron en un alto porcentaje el valor de resistencia de diseño), se quiso realizar un estudio al cemento empleado, para determinar su curva de resistencia y ver el efecto de este en la resistencia de los concretos; pero no fue posible en vista de que el lote de cemento empleado para las mezclas ya se había agotado, por lo que realizar la prueba al cemento que actualmente tiene el ICE no sería representativo de los valores obtenidos con los cilindros de concreto Chopo, por tal razón, no se realizó.

Comparación de costos

Como se observó en el cuadro 18 la comparación del costo del concreto Chopo con el Concreto ICE, los precios usados para la arena y cemento son los que actualmente maneja el ICE, en vista de que la arena empleada en el concreto Chopo es la misma que actualmente emplea el ICE. Según estos datos, se mantienen los mismos precios en los dos diseños.

En cuanto al agregado grueso se tomó el precio de venta en el tajo para los dos casos. Es importante destacar que para el concreto ICE, el monto indicado para el agregado grueso no representa el precio real del agregado para el ICE, ya que la institución compró vía licitación cerca de $5\,000 \text{ m}^3$ de agregado grueso, por lo que el precio por metro cúbico es sustancialmente más bajo que el normal de venta en el tajo. Al no poder estimarse el monto del agregado Chopo para el volumen adquirido por el ICE, se optó por comparar, como se indicó anteriormente, los precios de los agregados puestos en el tajo, e incluir el monto que actualmente paga el ICE por concepto de acarreo por metro cúbico por kilómetro, el cual es de $\text{¢ } 28/\text{m}^3 \cdot \text{Km}$.

El agregado grueso empleado por el ICE fue adquirido al quebrador Pocamar de Barranca, Puntarenas, la distancia de acarreo de este agregado es de 121 Km, mientras que para el Chopo es de 55 Km. Por lo que los montos por acarreo del cuadro 18, es producto de la distancia de acarreo respectiva por el precio antes indicado.

En este mismo sentido, de acuerdo con el cuadro 18, el costo del concreto para el ICE, con la resistencia indicada, es de ¢ 22 251,28, mientras que para la misma resistencia empleando el agregado grueso Chopo mediante el diseño ACI 211.1, el costo es de ¢ 20 378,67, según estos datos se obtiene una economía de 8,4 % (¢ 1 872,61) por metro cúbico. El costo del concreto con el otro método de diseño (ACI 211.2) es de ¢ 18 995,78, monto que genera una economía de 14,6% (¢ 3 255,50) por metro cúbico.

Para el caso de la comparación de los costos del concreto Chopo y Cañas, se empleó el diseño que se indica en el Catálogo General de Productos de Concreto, para un tamaño máximo del agregado grueso de 19 mm. Para determinar los precios se usaron los de venta del comercio, por lo que no se consideró monto por acarreo para el concreto Cañas, para el Chopo se tomó el precio de acarreo que actualmente cobran los transportistas de la zona Cañas, el cual es de ¢ 10 000,00 por 12 m³, para una distancia de 6 Km (del tajo al centro de Cañas).

Con estos datos se puede observar en el cuadro 19, que el empleo del agregado Chopo en mezclas de concreto de una resistencia de 210 kg/cm², comparada con el empleo de agregado que se puede adquirir en la zona de Cañas, representa un ahorro de 13,6% (¢ 3 400,50) por metro cúbico, cuando se emplea el método de diseño ACI 211.1, mientras que con el diseño ACI 211.2 el ahorro es de 19,5% (¢ 4 851,24).

En vista del alto porcentaje de absorción que presenta el material objeto de estudio (101 kg de agua por metro cúbico de agregado), se recomienda su empleo en condición saturada, con el fin de asegurarse de que el agua de absorción no pase a formar parte del agua de mezcla, y así evitar un aumento en la relación agua cemento y por ende una reducción en la resistencia final del concreto.

Cabe agregar que si no es posible tener el agregado en condición saturada, se recomienda mezclar inicialmente parte del agua de mezcla con los agregados. De esta manera tratar que estos tomen el agua de absorción y posteriormente, adicionar el cemento y el agua de mezcla restante, como lo indica la literatura (ACI 311).

Se recomienda realizar otros estudios al agregado Chopo, para ver su composición química, en vista de que se trata de un material volcánico, por lo que podría haber presencia de puzolanas, que al contacto con el cemento, estén contribuyendo con la resistencia del concreto, esto basado en los resultados obtenidos, ya que para todas las resistencias ensayadas, siempre se obtuvo mayor resistencia que la esperada. Por otra parte, también sería conveniente realizar pruebas para determinar el módulo de elasticidad de este concreto, valor importante para el ingeniero de diseño.

Finalmente se recomienda realizar otros estudios para evaluar la reducción del peso del concreto Chopo (carga muerta) en el diseño de obras de ingeniería (espesores y área de acero).

Observaciones finales

De los resultados obtenidos se desprende que es factible la utilización del agregado grueso Chopo para el diseño de mezclas de concreto en las obras de ingeniería.

Conclusiones

Una vez expuestos los resultados del estudio, con los cuales se logran los objetivos de esta investigación, se llega a las siguientes conclusiones:

Por las características propias del agregado Chopo, puede ser clasificado como agregado de peso normal o agregado de peso liviano.

Las pruebas realizadas a la piedra Chopo y a la arena Pijije demuestran que son aptos para su empleo como agregados en mezclas de concreto.

Los dos métodos indicados por el ACI (211.1 y 211.2) se pueden aplicar al agregado Chopo en el diseño de mezclas de concreto.

Los valores de resistencia a la compresión obtenidos de los cilindros fallados, superan los

valores esperados, con los dos métodos de diseño ACI utilizados.

Al utilizar la piedra Chopo como agregado grueso en mezclas de concreto, el precio por metro cúbico de este se reduce (8,4 a 19,5%).

En el diseño ACI 211.2 para el agregado Chopo, las mezclas requieren de mayor cantidad de agregado grueso, pero el costo del concreto por metro cúbico se reduce más.

Son más trabajables las mezclas preparadas con el diseño ACI 211.1, debido a que requiere menor cantidad de piedra Chopo.

Explotando el agregado del tajo Chopo para su empleo en mezclas de concreto, se evita tener que recurrir a nuevas fuentes de materiales, con ello se contribuye con el medio ambiente.

Apéndices

Apéndice 1 Ejemplo de método de diseño ACI 211.1.91

Ejemplo de método de diseño ACI 211.1.91 agregados de peso normal, para una resistencia de 175 kg/cm^2 , aplicando el factor de seguridad indicado en la metodología (15%), resistencia de diseño 201 kg/cm^2

Paso 1

Determinación del revenimiento (en la metodología que se indicó)
Revenimiento 7,6 a 10 cm.

Paso 2

Determinación del tamaño máximo (cuadro 5)
Tamaño máximo 19 mm.

Paso 3

Estimación de agua de mezcla (tabla A1.5.3.3 anexo 3)
Según tamaño máximo, cantidad de agua 205 kg/m^3 , contenido de aire 2%

Paso 4

Relación agua cemento (tabla A1.5.3.4 (a) anexo 3)
Para 201 kg/cm^2 se interpola A/C 0,70

Paso 5

Contenido de cemento, de paso 2 y 3.
 $205/C = 0,70$
Cemento = $205/0,70$
Cemento = 295 kg/m^3

Paso 6

Cantidad de agregado grueso (tabla A1.5.3.6 anexo 3).
Del cuadro 8 se obtiene el modulo de finura y del cuadro 11 el peso unitario del agregado Chopo.
Para M.F de 2,8 volumen de agregado grueso es de $0,62 \text{ m}^3$, valor que se multiplica por el peso

unitario del agregado grueso.

Peso de agregado grueso = $0,62 \cdot 1173 \text{ kg}$.

Peso de agregado grueso 727 kg

Paso 7

Determinación de agregado fino, por volumen absoluto o por el peso estimado del concreto fresco.

Para este caso se determina con los volúmenes absolutos, a partir de la gravedad específica de cada componente (cuadro 11).

Agua	205 kg	$0,205 \text{ m}^3$
Cemento	325 kg	$0,100 \text{ m}^3$
Chopo	727 kg	$0,409 \text{ m}^3$
Aire	2%	$0,020 \text{ m}^3$
Total		$0,734 \text{ m}^3$

Por diferencia cantidad de fino para un metro cúbico = $0,267 \text{ m}^3$, por peso 618 kg.

Paso 8

Corrección por humedad.

De Cuadro 11 se toma el porcentaje de humedad y absorción y se calcula la cantidad de agua en los agregados.

Peso de agregados húmedos (peso seco por % de humedad)

Chopo 818 kg

Arena 684 kg

Corrección por absorción (humedad menos absorción multiplicado por el peso de los agregados).

Chopo 17,7 kg

Arena 35,8 kg

Agua de mezcla del paso 3, menos los valores antes calculados.

Total de agua a agregar 151,5 kg.

Paso 9

Primer batida de prueba.

Se calcula la primer batida de prueba para un volumen de $0,02 \text{ m}^3$

Agua 3,03 kg

Cemento	5,90	kg
Chopo	16,37	kg
Arena	13,69	kg
Total de peso	39,98	kg

Cuando se está mezclando se estima el revenimiento y se decide si se agrega más agua o no. Si no se agregó más agua de la calculada y el revenimiento es el esperado, se procede con la preparación de la segunda batida con los pesos anteriores y se confeccionan los cilindros de prueba.

Si por el contrario se tiene que agregar más agua para obtener el revenimiento requerido, se debe realizar entonces los ajustes por rendimiento de la mezcla. Para esto se calcula el peso del concreto fresco, con este valor se calcula el rendimiento, dividiendo el peso de la sumatoria de los ingredientes de la batida de prueba entre el peso del concreto fresco. El valor obtenido se

multiplica por los pesos de la batida de prueba, con estos datos se obtienen los nuevos pesos de agua, cemento (manteniendo la relación A/C calculada en el paso 4), agregado grueso, para el agregado fino se procede igual que el paso 7 (todo de acuerdo con lo indicado en el ACI 211.1).

De forma similar se determina el diseño cuando se emplea el método de diseño ACI 211.2, con la salvedad de que se emplean las tablas indicadas en el ACI 211.2, diseño de mezclas de concreto estructural con el empleo de agregados livianos, para este caso se determinó el peso del agregado fino mediante la estimación del peso del concreto fresco.

Anexos

Anexo 1. Sección hoja Cañas, Instituto Geográfico Nacional.

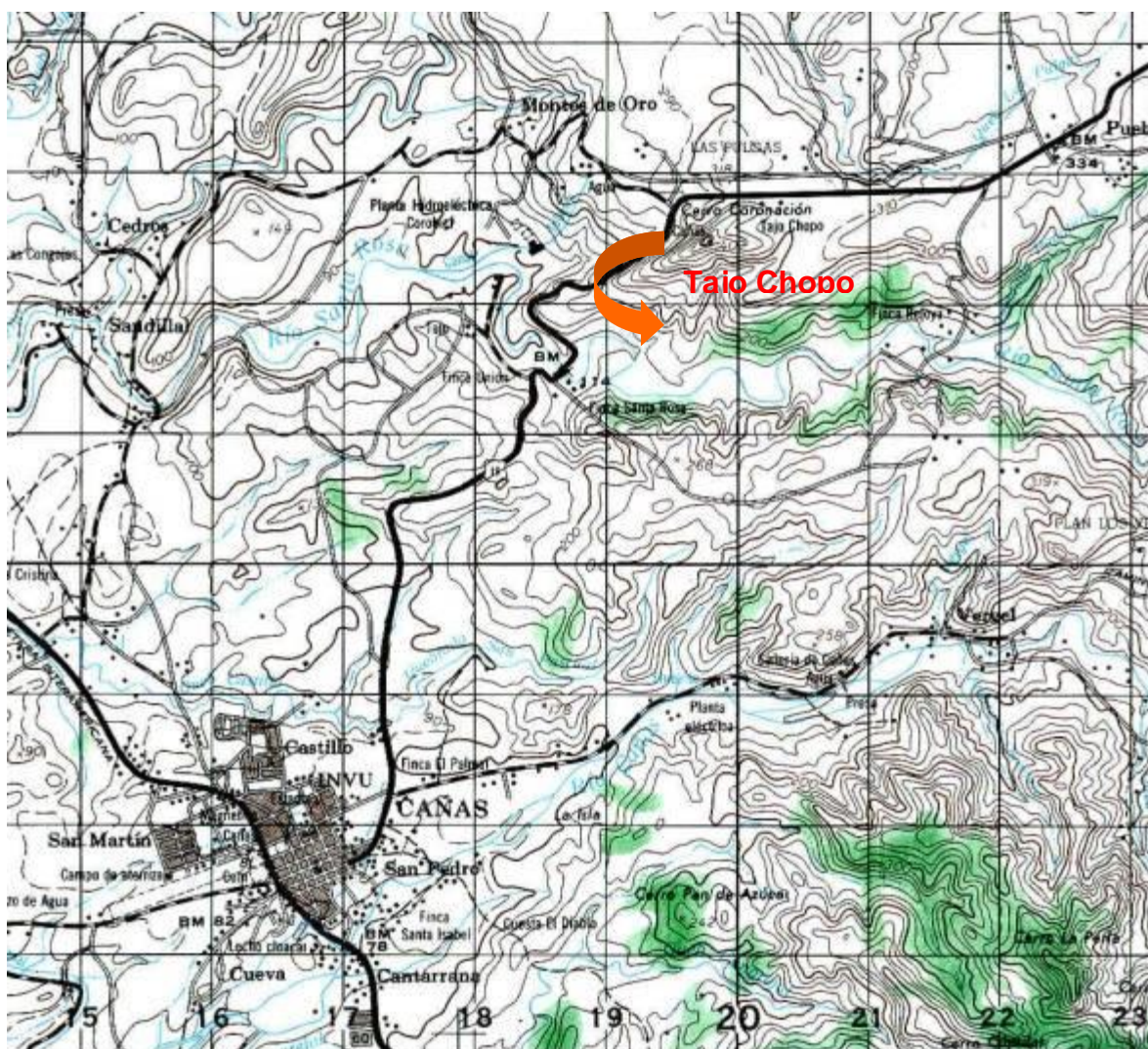
Anexo 2. Sección hoja Tempisque, Instituto Geográfico Nacional.

Anexo 3. Tablas para la dosificación de concreto normal y concreto estructural liviano, ACI 211.1 y ACI 211.2 (A1.5.3.1, A1.5.3.3, A1.5.3.4(a), A1.5.3.6, 3.2.2.1, 3.2.2.2, 3.2.2.3(a), 3.2.2.4, 3.2.2.5).

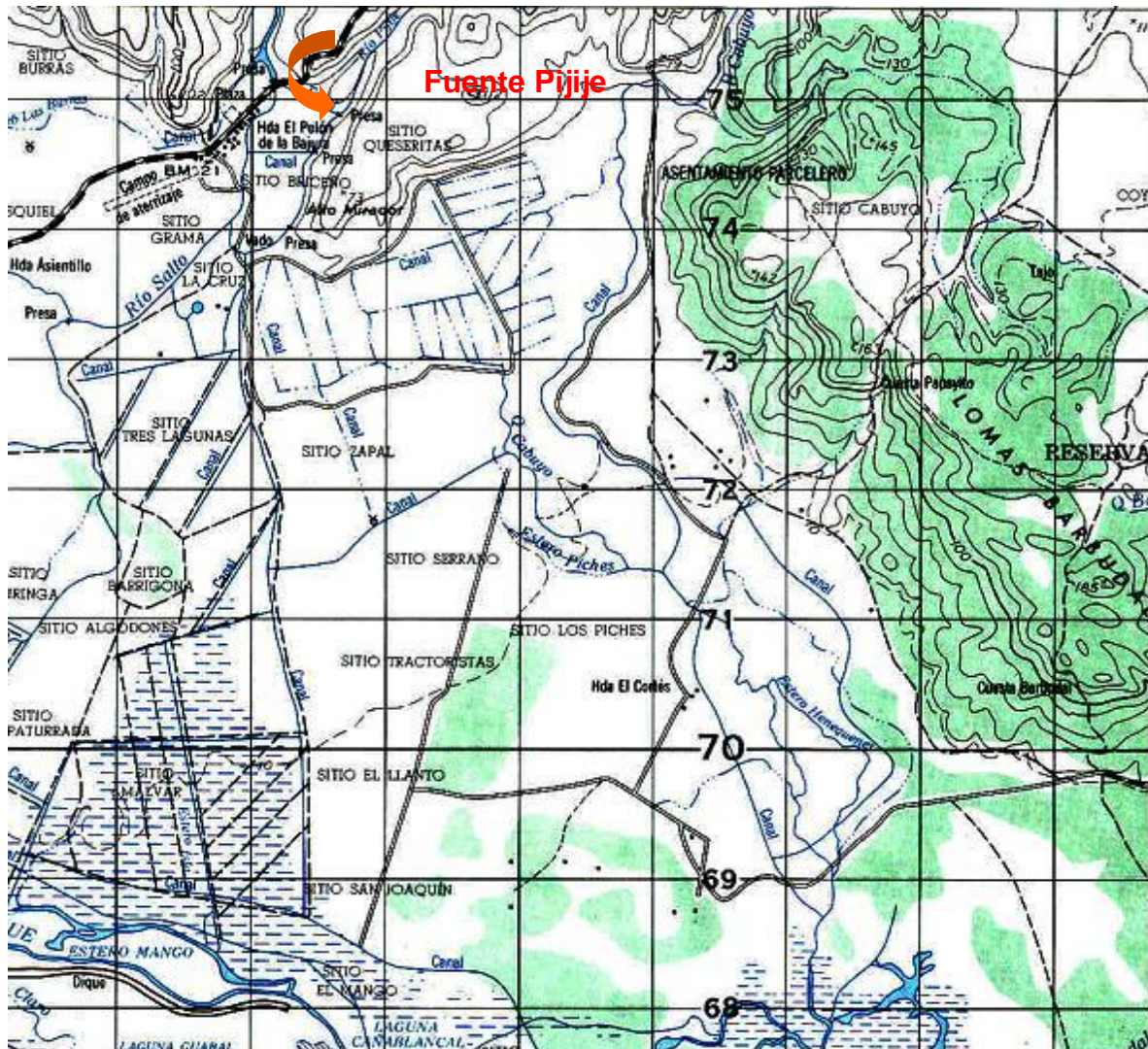
Anexo 4 Tablas de la norma N° 10854 MEIC.

Anexo 5. Tabla diseño empleada por el ICE.

Anexo 1
Sección de hoja Cañas, hoja 3147 II del Instituto
Geográfico Nacional



Anexo 2
Sección de hoja Tempisque, hoja 3147 III del
Instituto Geográfico Nacional



**TABLE A1.5.3.1 - RECOMMENDED SLUMPS
FOR VARIOUS TYPES OF CONSTRUCTION (SI)**

Type of construction	Slump, mm	
	Maximum	minimum
Reinforced foundation walls and footings	75	25
Plain footings, caissons, and substructure walls	75	25
Beams and reinforced walls	100	25
Building columns	100	25
Pavements and slabs	75	25
Mass concrete	75	25

(Imagen excel)

**TABLE A1.5.3.3- APPROXIMATE MIXING WATER AND AIR CONTENT REQUIREMENTS FOR DIFFERENT
SLUMPS AND NORMAL MAXIMUM SIZES OF AGGREGATES (SI)**

Slump, mm	Water, Kg/m ³ of concrete for indicated nominal maximum sizes of aggregate							
	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	150
Non-air-entrained concrete								
25 to 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 to 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 to 175	243	228	216	202	190	178	160	-
Approximate amount of entrapped air in non air-entrained concrete, percent	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
Air-entrained concrete								
25 to 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 to 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 to 175	216	205	197	184	174	166	154	-
Recommends average total air content, percent for level of exposure:								
Mild exposure	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Moderate exposure	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Extreme exposure	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

(Imagen excel)

**TABLE a1.5.3.4(a) - RELATIONSHIPS BETWEEN
WATER RATIO AND COMPRESSIVE
STRENGTH OF CONCRETE (SI)**

Compressive strength at 28 days, MPa	Water-cement ratio, by mass	
	Non-air-entrained concrete	Air-entrained concrete
40	0.42	-
35	0.47	0.39
30	0.54	0.45
25	0.61	0.52
20	0.69	0.60
15	0.79	0.70

(Imagen excel)

**TABLE A1.5.3.6 - VOLUME OF COARSE
AGGREGATE PER UNIT OF VOLUME
OF CONCRETE (SI)**

Nominal maximum size of aggregate, mm	Volume of dry-rodded coarse aggregate per unit volume of concrete for different fineness moduli of fine aggregate			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.5	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.6
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.8	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

(Imagen excel)

Tablas ACI 211.2

**Table 3.2.2.2 - Approximate mixing water and
air content requirements for different slumps and
nominal maximum sizes of aggregates**

Slump, in.	Water, lb/yd ³ of concrete for indicated nominal maximum sizes of aggregate		
	3/8 in.	1/2 in.	3/4 in.
Air-entrained concrete			
1 to 2	305	295	280
3 to 4	340	325	305
5 to 6	355	335	315
Recommended average total air content, percent, for level of exposure			
Mild exposure	4.5	4.0	4.0
Moderate exposure	6.0	5.5	5.0
Extreme exposure	7.5	7.0	6.0
Non -air-entrained concrete			
1 to 2	350	335	315
3 to 4	385	365	340
5 to 6	400	375	350
Approximate amount of entrapped air in non-air- entrained concrete, percent	3.0	2.5	2.0

(Imagen excel)

Table 3.2.2.4 - Volume of coarse aggregate per unit of volume of concrete

Maximum size of aggregate, in.	Volume of dry-rodded coarse aggregate per unit volume of concrete for different fineness moduli of fine aggregate			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8	0.58	0.56	0.54	0.52
1/2	0.67	0.65	0.63	0.61
3/4	0.74	0.72	0.7	0.68

(Imagen excel)

Table 3.2.2.5 - First estimate of weight of fresh lightweight concrete comprised of lightweight coarse aggregate and normal weight fine aggregate

Specific gravity factor	First estimate of lightweight concrete weight, lb/yd3		
	Air entrained concrete		
	4%	6%	8%
1	2690	2630	2560
1.2	2830	2770	2710
1.4	2980	2910	2850
1.6	3120	3050	2990
1.8	3260	3200	3130
2	3410	3340	3270

(Imagen excel)

Table 3.2.2.3 (a) - Relationships between water-cement ratio and compressive strength of concrete

Compressive strength at 28 days, psi	Approximate water-cement ratio, by weight	
	Non-air-entrained concrete	Air-entrained concrete
6000	0.41	-
5000	0.48	0.40
4000	0.57	0.48
3000	0.68	0.59
2000	0.82	0.74

(Imagen excel)

TABLA 1
REQUISITOS GRANULOMETRICOS
PARA LOS AGREGADOS FINOS

Tamiz	Porcentaje que pasa
9,5 mm	100
Nº 4 (4,75 mm)	95 a 100
Nº 8 (2,36 mm)	80 a 100
Nº 16 (1,18 mm)	50 a 85
Nº 30 (0,60 mm)	25 a 60
Nº 50 (0,30 mm)	10 a 30
Nº 100 (0,15 mm)	2 a 10

TABLA 2
LIMITES MAXIMOS DE SUSTANCIAS DELETEREAS
CONTENIDAS EN EL AGREGADO FINO PARA CONCRETO

Item	Porcentaje por peso en La muestra total. Máx.
Terrones de arcilla y partículas friables	
a) Arenas de río y mar	3.0
b) Arenas de tajo	4.0
Material que pasa el tamiz Nº 200	
a) Arenas de río y mar	4.0
b) Arenas manufacturadas	5.0 ⁽¹⁾
c) Arenas de tajo	7.0 ⁽¹⁾
Carbón y lignito	
- Cuando las apariencias de la superficie de concreto es de importancia	0.5 1.0
- Todos los otros concretos	
⁽¹⁾ El porcentaje permisible de material pasando el tamiz Nº 200, considera que es prácticamente libre de arcilla o pizarra. Si contiene arcilla permisible debe bajarse a 3.0% en b) y a 5% en c).	

TABLA 3

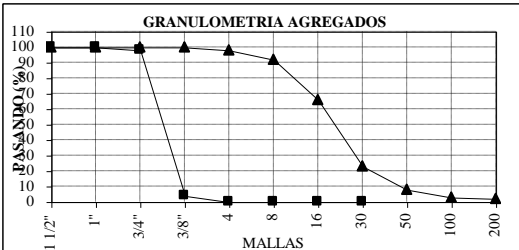
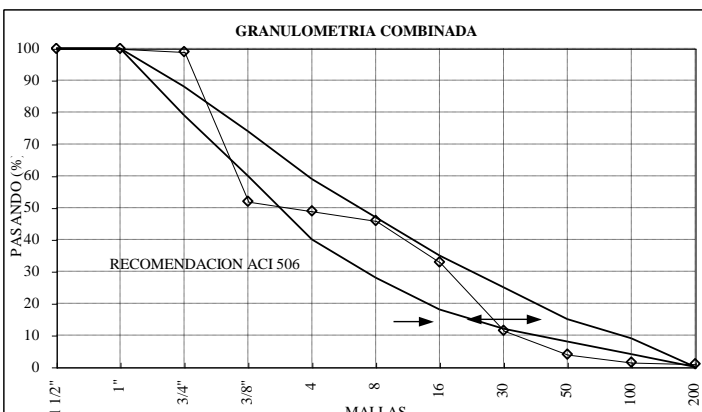
REQUISITOS GRANULOMETRICOS PARA LOS AGREGADOS GRUESOS

TIPO DE PIEDRA	TAMAÑO NOMINAL (TAMICES CON ABERTURAS CUADRADAS)	PORCENTAJES POR PESO QUE PASAN LOS DIFERENTES TAMICES									
		75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	Nº4 4,75 mm	Nº8 2,36 mm
1	63 a 37,5 mm	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5				
2	50 a 4,75 mm		100	95 a 100		35 a 70		10 a 30		0 a 5	
3	37,5 a 4,75 mm (Nº 4)			100	95 a 100		35 a 70		10 a 30	0 a 5	
4	25,0 a 4,75 mm (Nº 4)				100	95 a 100		25 a 60		0 a 10	0 a 5
4tilla	19,0 a 4,75 mm (Nº 4)					100	90 a 100		20 a 55	0 a 10	0 a 5
5	12,5 a 4,75 mm (Nº 4)						100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 10
5tilla	9,5 a 2,36 mm (Nº 8)							100	85 a 100	10 a 30	0 a 10

TABLA Nº 4
LIMITES MAXIMOS DE SUSTANCIAS DELETEREAS
Y PROPIEDADES FISICAS EN EL AGREGADO GRUESO
PARA CONCRETO

Item	Porcentaje por peso en La muestra total. Máx.
Terrones de arcilla y partículas desmenuzables	5.0
Material que pasa el tamiz Nº 1.0 ⁽¹⁾	1.0 ⁽¹⁾
Carbón y lignito	0.5
Porcentaje de pérdidas por abrasión	50
Sanidad (porcentaje de pérdida en cinco ciclos con sulfato de sodio)	
⁽¹⁾ En el caso de piedra quebrada si el material más fino que el tamiz Nº 200 consiste de polvo de piedra, libre de arcilla o pizarra el porcentaje indicado puede aumentarse a 2.0%.	
⁽²⁾ Agregado grueso que no cumpla con el requisito de sanidad especificado si se demuestra que existen concretos de la calidad requerida con agregados de la misma procedencia, los cuales han dado un servicio satisfactorio.	

DISEÑO 210-PCM
ELEMENTOS IMPORTANTES
210 kg/cm² a los 28 días

DESCRIPCION	DATOS	VOLUMEN	PROPIEDADES DE AGREGADOS				
TIPO	FLUIDO		MATERIAL	Gbs	Absorción	Peso Unitario	Humedad
RESISTENCIA (28 DIAS)	210 kg/cm2						
REVENIMIENTO	18 - 20 cm		3/4"	2.66	1.75	1398	0.00
A/C	0.62		ARENA	2.46	3.86	1336	0.00
CEMENTO	320 kg/m3	108 litros	<div>GRANULOMETRIA AGREGADOS</div> 				
AGUA	198 litros	198 litros					
AIRE INCLUIDO	2 %	20 litros					
	TOTAL	327 litros					
AGREGADOS	PORCENTAJE	VOLUMEN	PESO TOTAL	VOLUMEN SUELTO		PIES 3	
3/4" (POCAMAR)	50 %	337 litros	895 kg	0.640 m3		22.61	
ARENA BLANCA	50 %	337 litros	828 kg	0.620 m3		21.88	
DOSIFICACIONES							
MATERIAL	BATIDA DE 1 m3	<div>GRANULOMETRIA COMBINADA</div> 					
CEMENTO	320 kg						
AGUA	198 litros						
3/4" (POCAMAR)	895 kg						
ARENA BLANCA	828 kg						
ADITIVO FLUIDIFICANTE	6 cc/kg/c						

Referencias

- Alvarado, G. 2000. **LOS VOLCANES DE COSTA RICA**. Costa Rica: Editorial UNED.
- Nilson, A. 1994. **DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO**. USA: Editorial MacGraw-Hill.
- Muñoz, F. 1998. **COMPONESTES PRINCIPALES DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO**. Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Ramírez C., A. 1994. *CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS NACIONALES: RESTO DEL PIAS*. **CIVCO**. Costa Rica. No 11:21 p.
- Mora, S. 1977. *ESTUDIO GEOLÓGICO DEL CERRO CHOPO*. **REV. GEOGRAFIA AMERICA CENTRAL**, 5-6. 189-199 Heredia.
- ACI. 1998. Standard Practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI 211.1-91.
- ACI. 1998. Standard Practice for selecting proportions for structural lightweight concrete. ACI 211.2-91.
- ACI. 1985. Manual de inspección del hormigón. ACI 311.
- AASHTO. Métodos de muestreo para piedra, escoria, grava, arena, y bloques de piedra para ser usados como materiales en la construcción de carreteras. AASTO T2
- ASTM. 2000. Standard test method for unit weight and voids aggregate. C 29.
- ASTM. 2000. Standard specification for concrete aggregates. C 33
- ASTM. 2000. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. C 39.
- ASTM. 2000. Standard test method for organic impurities in fine aggregates for concrete. C 40.
- ASTM. 2000. Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. C 88.
- ASTM. 2000. Standard test method for materials finer than No 200 sieve in mineral aggregates by washing. C 117.
- ASTM. 2000. Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate. C 127.
- ASTM. 2000. Standard test method for specific gravity and absorption of fine aggregate. C 128.
- ASTM. 2000. Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the los angeles machine. C 131.
- ASTM. 2000. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. C 136.
- ASTM. 2000. Standard test method for unit weight, yield and air content (gravimetric) of concrete. C 138.

- ASTM. 2000. Standard test method for clay lumps and friable particles in aggregates. C 142.
- ASTM. 2000. Standard test method for slump of hydraulic cement concrete. C 143.
- ASTM. 2000. Standard test method for making and curing concrete test specimens in the laboratory C 192.
- ASTM. 2000. Standard test method for organic impurities in fine aggregates for concrete. C 40.
- .
- ASTM. 2000. Standard test method for organic impurities in fine aggregates for concrete. C 40.
- Solano, J. 1991. *NOTAS CURSO DE CONCRETO*. Cartago.
- Solano, J. 1991. *NOTAS CURSO DE LABORATORIO DE CONCRETO*. Cartago.
- M.O.P.T., 2002. **LABORATORIO DE MATERIALES**. COSTA RICA
- Ministerio de Economía Industria y Comercio. 1980 Norma oficial de especificaciones para los agregados finos y gruesos para concreto. Imprenta Nacional. San José.
- Productos de Concreto S.A. 1992. **Catálogo General**. Costa Rica.
- Salas, A., Fernández, A. 1992. **EVALUACIÓN DE LAS PROPORCIONES RECOMENDADAS PARA MEZCLAS DE CONCRETO EN OBRAS MENORES UTILIZANDO DOS FUENTES DE AGREGADOS NACIONALES**. Informe proyecto final de graduación. Escuela de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 45 p.
- Brenes, J. 1968. *Concreto liviano estructural*. **ASOCIACIÓN CENTROAMERICACA DEL CEMENTO Y CONCRETO**. Tac-14. 8p.
- Correa, R. 2002. Usos de la piedra Chopo en carreteras. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Cañas. Comunicación personal.

Se presenta un informe de los estudios realizados al agregado grueso proveniente del tajo Chopo, con miras a determinar su uso en el diseño de mezclas de concreto de varias resistencias; así mismo la comparación del costo de este concreto con el empleado por el ICE, en el Proyecto Geotérmico Miravalles y en la zona de Cañas.